

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Simulace tramvajové dopravy

Tram Transport Simulation

Student:

Martin Hradil

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Michal Dorda, Ph.D.

Ostrava 2012

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Hradil**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2301R003 Dopravní technika a technologie
Téma: Simulace tramvajové dopravy
Tram Transport Simulation

Zásady pro vypracování:

Osnova práce:

1. Úvod.
2. Teoretická východiska pro řešení.
3. Analýza vstupních dat.
4. Tvorba simulačního modelu.
5. Vyhodnocení provedených experimentů.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

KŮS, Z.- GLOMBÍKOVÁ V. - HALASOVÁ, A. *Simulace výrobních systémů - díl 1*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. 2002. ISBN 55-082-02.
Manuály k simulačnímu software Witness.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

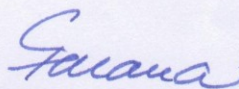
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Dorda, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



doc. Ing. Vladimír Smrž, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- souhlasím s tím, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečné ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněná v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych poděkovat za čas, cenné rady, připomínky a pomoc vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Dordovi Ph.D.

Dále děkuji panu Ing. Robertu Hackenbergovi z Dopravního podniku Ostrava a.s. za poskytnutí cenných informací k provozu tramvajové dopravy na jednokolejném úseku.

Děkuji i svému kolegovi Karlu Golcovi za jeho čas, při pomoci s provedením dopravního průzkumu.

Anotace bakalářské práce

HRADIL, M. Simulace tramvajové dopravy. Ostrava: Institut dopravy, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012, 79 str. Bakalářská práce, vedoucí Dorda, M.

Bakalářská práce se zabývá konstrukcí simulačního modelu tramvajové dopravy na jednokolejné trati v úseku mezi zastávkami Svinov mosty horní zastávka a Nová Ves vodárna. První část práce se zabývá analýzou získaných měřených charakteristik získané z provedeného dopravního průzkumu. Následně je popsáno sestavení simulačního modelu v simulačním programu Witness. V další části je provedení dvou simulačních experimentů na základě jiného způsobu vpouštění tramvají na jednokolejnou trať a tím snížení doby zdržení tramvají. V závěru práce je provedeno vyhodnocení těchto provedených simulačních experimentů a doporučení k možnému řízení tramvajové dopravy.

Annotation of Thesis

HRADIL, M. Tram transport Simulation. Ostrava: Institute of Transport, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB – Technical University of Ostrava, 2012, 79 p., Thesis, head: Dorda, M.

This Thesis describes the construction of tram transport simulation model for single-track section between stops Svinov mosty horní zastávka and a Nová Ves vodárna. The first part deals with the analysis of acquired characteristics obtained from measurements carried out of traffic surveys. Subsequently, the assembly of the simulation model described in the simulation program Witness. The next part is an implementation of two simulation experiments based on other way of admission to the monorail tram line, thus reducing the time delay of trams. The conclusion is an evaluation of simulation experiments carried out and recommendations for possible tram control.

Obsah

Seznam použitých zkratk	8
1 Úvod	9
2 Teoretická východiska pro řešení	10
2.1 Městská hromadná doprava	10
2.2 Simulační program Witness	14
2.2.1 Základní pojmy	14
2.2.2 Witness	20
2.2.3 Obecná stavba modelu	21
2.3 Teorie hromadné obsluhy	22
3 Analýza vstupních dat	26
3.1 Technické parametry tratě	26
3.2 Organizace tramvajové dopravy	27
3.3 Dopravní průzkum	28
3.4 Pearsonův χ^2 test dobré shody	32
4 Tvorba simulačního modelu	38
4.1 Validace simulačního modelu	49
4.2 Porovnání simulačních výstupů v rámci validace modelu	52
5 Vyhodnocení provedených experimentů	54
5.1 Simulační experiment č. 1	54
5.1.1 Úprava simulačního modelu pro experiment č. 1	54
5.2 Simulační experiment č. 2	56
5.2.1 Zpracování náhodného výběru	56
5.2.2 Úprava simulačního modelu pro experiment č. 2	59
5.3 Vyhodnocení simulačních experimentů	63
6 Závěr	64
Seznam použité literatury	66
Seznam příloh	68

Seznam použitých zkratk

a.s.	.....	akciová společnost
aj.	.....	a jiné
apod.	.....	a podobně
h.z.	.....	horní zastávka
h	.....	počet odhadovaných parametrů rozdělení
k	.....	počet variant proměnné
max.	.....	maximálně
MHD	.....	městská hromadná doprava
MS	.....	Microsoft
n	.....	rozsah souboru
n_i	.....	pozorovaná četnost
$n \cdot \pi_{0,i}$	.....	pozorovaná (teoretická) četnost
R	.....	variační rozpětí
resp.	.....	respektive
s.r.o.	.....	společnost s ručením omezeným
T_d	.....	dolní mez konfidenčního intervalu
T_h	.....	horní mez konfidenčního intervalu
tj.	.....	to je
tzn.	.....	to znamená
v_i	.....	váha pozorované četnosti
v_{\max}	.....	nejvyšší varianta proměnné
v_{\min}	.....	nejnižší varianta proměnné
\bar{x}	.....	výběrový průměr
x_{obs}}	.....	pozorovaná hodnota testové statistiky
$z_{1-\frac{\alpha}{2}}$	.....	kvantil normovaného rozdělení
α	.....	hladina významnosti
$\hat{\lambda}$	.....	parametr Poissonova rozdělení
σ	.....	směrodatná odchylka
χ_{krit}}	.....	kritická hodnota testu

1 Úvod

V dnešní době se ve velkých, ale i menších městech setkáme s městskou hromadnou dopravou. Ať už se jedná o tramvajovou, autobusovou nebo trolejbusovou dopravu, je čím dál více zdůrazňováno, aby lidé pro své cestování do práce, škol, k lékaři nebo k nákupu ve městě využívaly systém MHD.

Důvodů proč využívat MHD je několik, velké množství automobilů na dopravních komunikacích především ráno, kdy lidé cestují do práce a odpoledne, kdy se vrací domů, způsobují dopravní kolony na cestách, průjezd městem se prodlužuje a s tím souvisí větší pravděpodobnost dopravních komplikací vzniklé např. dopravní nehodou. Automobily mají větší emise než dopravní prostředky používané v MHD (tramvaj, trolejbus), tím se zhoršuje kvalita ovzduší ve velkých městech, v zimních měsících dochází ve velkých městech k vytváření smogu.

Proto je čím dál více kladen důraz na využívání MHD, která je šetrnější k životnímu prostředí, síť dopravních linek pokrývá většinu města a nezpomaluje dopravní provoz ve městech.

Bakalářská práce se zabývá sestavením simulačního modelu vybraného úseku tramvajové dopravy. Vybraným úsekem je nově vytvořená dočasně upravená jednokolejná trať mezi zastávkami Svinov mosty h.z. a zastávkou Nová Ves vodárna. Za normálních podmínek, zde probíhá tramvajová doprava po dvoukolejné trati. Tato úprava tratě byla nutná z důvodu rekonstrukce Svinovských mostů. Toto dopravní spojení tvoří část hlavní páteřní sítě městské hromadné dopravy a spojuje městskou část Poruba s centrem města Ostrava. Tímto úsekem často projíždím, proto mě zajímalo, jak je v této části tramvajová doprava řízena. Proto jsem si pro svou práci vybral právě tento jednokolejný úsek.

Výstupem práce je sestavení simulačního modelu, který bude svými vlastnostmi simulovat reálný provoz a provedení simulačních experimentů a porovnání jejich výsledků na základě reálného provozu. Tyto výsledky jsou uvedeny v závěru bakalářské práce.

2 Teoretická východiska pro řešení

V této kapitole budou probrány některé základní pojmy týkající se městské hromadné dopravy, provozující tramvajovou dopravu a obecné zásady simulace a optimalizace simulačního programu Witness.

2.1 Městská hromadná doprava

Pojem „městská hromadná doprava“ a jeho často užívaná zkratka „MHD“ je všeobecně známý a často používaný výraz. Mnoho z nás této služby každodenně několikrát využíváme, ať už při cestování do zaměstnání, školy, k lékaři, nebo pro své osobní potřeby.

Městskou hromadnou dopravu provozuje dopravce a jeho činnost spočívá v pravidelné přepravě osob, jejich zavazadel, spoluzavazadel a živých zvířat, přepravované veřejnými drážními vozidly osobní dopravy a veřejné silniční osobní dopravy. Přepravní proces je poskytován na území města, případně v jeho příměstských oblastech.

Doprovce může být právnická nebo fyzická osoba provozující drážní nebo silniční dopravu na základě příslušných zákonů.

Systémy MHD se rozlišují typem druhu dopravy tj. dopravními prostředky, kterými činnost MHD zajišťují.

Druhy dopravy				
Silniční motorová doprava	autobusová			nekolejová
Dražní doprava	trolejbusová			
	tramvajová			
	železniční	speciální	metro	
			městské a příměstské dráhy	
		regionální		
		celostátní		
	lanová			
nekonvenční druhy dopravy			zvláštní	

¹Obr. 2.1 – Druhy dopravy

Tramvajová doprava je jedním ze systémů kolejové MHD, provozuje se po tramvajových tratích (zpravidla dvoukolejných).

Podle prostorového způsobu vedení tramvajových tratí je můžeme dělit na:

- v úrovni vozovky městské komunikace,
 - jízdní pruhy společné s automobilovou dopravou,
 - jízdní pruhy vyhrazené pro tramvaj v podélné ose komunikace,
 - jízdní pruhy vyhrazené pro tramvaj po obou stranách komunikace,
- na zvláštním tělese,
- na zvláštním samostatném tělese mimo městské komunikace.

Vlaky se sestavují zpravidla ze dvou vozů. K činnosti tramvajové dopravy musí být vybudovány:

- kolejový svršek,
- trakční trolejové vedení a s ním stožáry a podzemní kabelové spojení,
- měničny proudu,
- tramvajové zastávky,
- konečné stanice s obratištěm,
- vozovny (depa tramvají).

Tramvaj, je kolejové drážní vozidlo závislé na trakčním vedení napájené přívodem trakčního proudu a svou koncepcí a konstrukcí uzpůsobené pro provoz na pozemních komunikacích.

V našich městech je provozováno několik typů tramvají např.

- T3
- K2
- K3R-N
- T6A5
- KT8D5
- Škoda LTM 10.08
- T3R.EV

vyrábí se, ale několik dalších variant tramvají, které se liší konstrukčními celky jako je např. elektrická výzbroj, uspořádání vnitřního prostoru, počet sedadel apod.

Kolejová trať slouží k vedení tramvaje ve směru jízdy. Budují se v centrech města, kde se ukládají do vozovky silniční pozemní komunikace. Temena kolejnic jsou v úrovni vozovky, tudíž nedochází k převýšení komunikace a tímto je zabezpečen plynulý přejezd kolejové tratě nekolejovými dopravními prostředky. Mimo město se nachází kolejová trať na vlastním tělese.

Zastávky tramvajové dopravy jsou místa na trati předepsaným způsobem označená a vybavená, určená k nástupu, výstupu nebo přestupu cestujících, umožňující co nejkratší časový přestup mezi ostatními linkami MHD, ale i jinými druhy doprav.

²Při umístění zastávky je nutné dodržet bezpečnost a plynulost silničního provozu a to tak:

- dostatečně oddělený prostor pro pohyb chodců, vozidel a cyklistů,
- bezpečný přehled o nástupu a výstupu cestujících ze stanoviště řidiče,
- vybavení bezbariérového přístupu pro osoby s tělesným postižením,
- stavební uspořádání pro plynulý a hospodárný pohyb chodců,
- v okolí zastávky zřízení jízdních pruhů nebo pásů pro cyklisty,
- vybavení kvalitním povrchem,
- dostatečné odvodnění zastávky,
- dopravní značení.

Dále dělíme tramvajové zastávky podle stavebního uspořádání a rozeznáváme je na:

- s nástupem v úrovni pozemní komunikace,
- s nástupním ostrůvkem,
- s nástupištěm.

Konečná stanice je umístěna na konci každé trati. Rozdělujeme je na smyčky a úvratě.

Smyčka je použita k ukončení kolejové tratě, na které se provozují jednosměrná vozidla, (tj. stanoviště řidiče pouze v čelní části vozidla ve směru jízdy, dveře pouze na jedné boční straně vozidla). Smyčka je vybavena zastávkou pro výstup a nástup a místem pro vyčkávání před jízdou vozidla.

Úvrat' je nejjednodušší prostorový způsob ukončení kolejové tratě. Na rozdíl od smyček se používají pro obousměrná vozidla (tj. stanoviště řidiče v obou čelních částech vozidla, dveře na obou bočních stranách vozidla).

²Dostupné na WWW: <<http://fast10.vsb.cz/mahdalova/MHD/predna01.pdf>>

2.2 Simulační program Witness

V této kapitole budou probrány základní pojmy související s navrhováním simulačních experimentů a uvedou se zásady pro správné vytvoření simulačního modelu a aplikování těchto zásad v simulačním programu Witness.

2.2.1 Základní pojmy

Systém představuje zjednodušený obraz objektu, který zkoumáme. Byl vytvořen ze systémového přístupu jako abstraktní objekt. Lze ho popsat nejjednodušší definicí, která pochází od L. von Bertalanffyho ³, „*Systém je komplex prvků nacházejících se vzájemné interakci.*“ Systémy dělíme podle abstrakce stavěné k významu času a to na:

- *statické* – používané u systémů, ve kterých se od času abstrahuje,
- *dynamické* – u těchto systémů hraje čas důležitou roli. Vnímání času v systému umožňuje sledovat, zda nastanou (současně dvě události, nebo jedna událost nastane dříve než druhá).

Model zobrazuje zjednodušený obraz skutečnosti sledovaného objektu. K vytvoření modelu je potřeba zachytit ty stránky daného jevu, které jsou pro jeho sestavení nejdůležitější. Existuje mnoho způsobů a hledisek, podle kterých dělíme modely.

Modely podle fyzické podoby dělíme na:

- ikonické,
- analogové,
- matematické.

³KOČÍČKA, Petr. *Simulační metody jako nástroj pro rozhodování podniku - modelování pomocí programu Witness*. [s.l.], 2009. 108 s. Masarykova univerzita, Ekonomicko-správní fakulta. Vedoucí diplomové práce Ing. Radoslav Škapa, Ph.D. [online] 2009 [cit. 2012-01-30] Dostupný z WWW: <http://is.muni.cz/th/2840/esf_m/Diplomova_prace_Petr_Kocicka_2840.pdf>. s. 9.

Ikonické jsou nejméně abstraktní, zobrazují fyzickou repliku modelu ve zmenšeném měřítku, (např. modely automobilů, vlaků, letadel).

Analogové modely zdají se být jako funkční reálné objekty, ale nevypadají tak, (např. výrobní výkresy, stavební plány budov).

Matematické modely se používají jako abstraktní modely, které využívají k formulaci reálného objektu symboly, matematické výrazy a vztahy. U těchto modelů nelze využít fyzikální experimenty. Samotné modely nemohou podávat informace při hodnocení zkoumaného děje. Tyto informace se získají vhodným počítačovým softwarem, kterým model řešíme.

Modely podle charakteru procesu dělíme na:

- deterministické,
- stochastické.

Deterministické modely nevyužívají náhodných veličin. Jsou jednoznačně určeny stejnými vstupy, ke kterým přiřazujeme stejné výstupy. (Modely systémů s deterministickým chováním).

Stochastické modely využívají charakter náhodných veličin. K zadaným vstupům přiřazujeme výstupy podle určité pravděpodobnosti. (Modely systémů se stochastickým chováním).

Modely z hlediska definičního oboru proměnných dělíme na:

- spojitě,
- diskrétní.

Spojitě modely pracují na základě proměnných, které mění své hodnoty v závislosti na sledovaném čase spojitě. Jsou vhodné pro sledování konstantního, spojitého toku informací

a materiálu. Rychlost změn proměnných v čase u spojitých modelů jsou reprezentovány diferenčními, diferenciálními nebo algebraickými rovnicemi.

Diskrétní modely pracují na základě proměnných, které mění své hodnoty nespojitě v určitých časových okamžicích. Využívají se při modelování konkrétních operací. Tyto modely vyhodnocují statistické výsledky, které jsou velmi přesné, a je výhodné jejich použití u podniků s nižší úrovní. Modely mohou snížit provozní náklady, sladit potřeby různých pracovišť.

⁴**Modelování** je široký obor aplikací, které se využívají u výpočetní techniky a jsou zaměřeny na modelování v následujícím smyslu: „*Podstatou modelování ve smyslu výzkumné techniky je náhrada zkoumaného systému jeho modelem (přesněji: systémem, který ho modeluje). Cílem je získat pomocí pokusů s modelem informaci o původním zkoumaném systému*“.

Analytické modely jejich podoba je většinou formou různých matematických funkcí, které sledují funkční vztahy mezi vstupními proměnnými. Řešení získáme pomocí vztahů, do kterých dosadíme hodnoty vstupních proměnných. Složitost těchto vztahů je přímo úměrná složitosti vztahů mezi vstupními veličinami.

Simulační modely se snaží o co největší napodobení chování reálného objektu a následně sledování jeho chování v čase. Tyto modely jsou deskriptivní. Nedochází k zjištění požadovaného cíle, pouze nám sdělí informace, co se stane za určitých podmínek.

Simulace představuje napodobování činnosti reálného systému a zároveň jeho vývoj v čase tvorbou simulačního procesu. Simulace vznikla z metody Monte Carlo, která se postupem času oddělila v samostatnou disciplínu. Základem simulace je propojení jednotlivých odvětví statistiky, informatiky, teorie systémů, teorie pravděpodobnosti a operačního výzkumu.

⁴KÚS Z., GLOMBÍKOVÁ V., HALASOVÁ A. *Simulace výrobních systémů – díl 1*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. 2002. ISBN 55-082-02.

⁵**Výhody simulace:**

- vytvořený model slouží k lepšímu porozumění modelovaného reálného systému,
- využití simulačního modelu jako nástroj tréninku sloužící k získávání zkušeností (např. školení zaměstnanců),
- během simulace nedochází k narušení reálného chodu systému,
- vytvořený model slouží k lepšímu porozumění modelovaného reálného systému,
- využití simulačního modelu jako nástroj tréninku sloužící k získávání zkušeností (např. školení zaměstnanců),
- pomocí simulace můžeme komplexně nahlédnout na studovaný problém a můžeme sledovat analýzu různých parametrů,
- v simulaci je možné čas zrychlit.

⁶**Nevýhody simulace:**

- vytvořený model nemusí mít takovou přesnost, aby odpovídal reálnému systému,
- v závislosti na složitosti simulovaného systému, může způsobit dlouhou dobu vytvoření modelu, což může být i velice nákladné,
- simulace je méně přesná než analytické řešení, z důvodu obsahu prvku náhody, při zobrazení systému matematickým modelem je použití lepší než simulace.

^{5,6} PRZYBYLSKI, Lukáš. *Simulační metody jako nástroj pro rozhodování podniku - modelování pomocí programu Witness*. [s.l.], 2008. 90 s. Masarykova univerzita, Ekonomicko-správní fakulta. Vedoucí diplomové práce Ing. Radoslav Škapa, Ph.D. [online] 2008 [cit. 2012-01-30] Dostupný z WWW: <http://is.muni.cz/th/100100/esf_m/>. s. 36.

Nyní uveďme několik základních pojmů a jejich definice v oblasti základů simulace.

Prvek (entita) má podobu dynamického prvku, který je základní stavební částí systému a pohybuje se v průběhu času systémem.

Standardní atribut jsou vlastnosti přiřazené k prvkům. Tyto prvky mohou mít hodnotu:

- numerickou,
- booleovskou,
- textovou.

Referenční atribut určuje vztahy mezi prvky daného systému.

Vstupní a výstupní proměnné informace sloužící ke komunikaci s okolím přes vstupní a výstupní kanály.

Stavové proměnné jsou pomocné veličiny, kterými je stav systému popisován.

Událost změna vyvolána v simulovaném modelu.

Experiment činnost, kterou provádíme různé změny modelovaného systému a následně sledujeme chování modelu při těchto změnách.

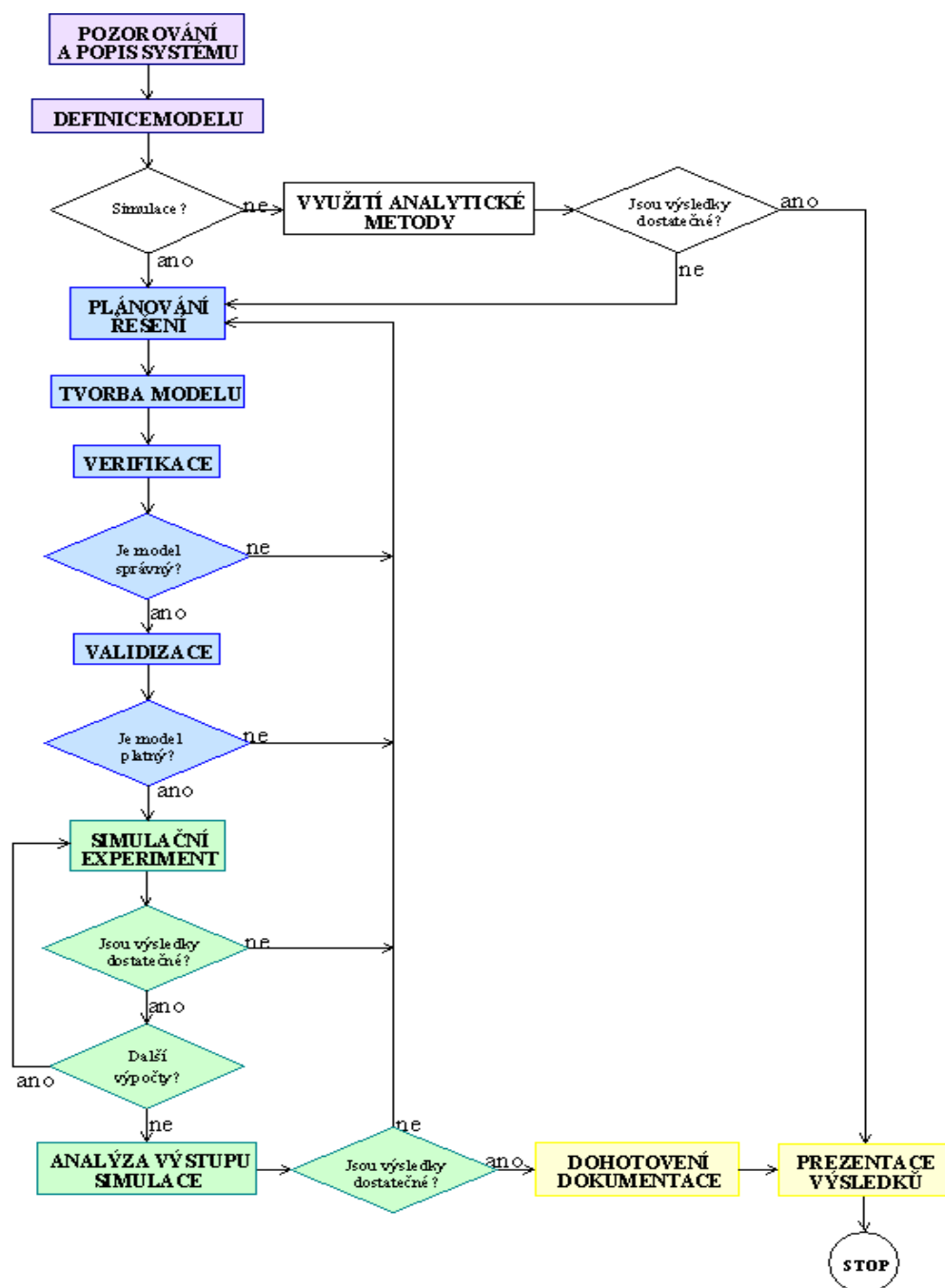
Aktivita zobrazuje stav prvku mezi dvěma důležitými událostmi, které jsou pro prvek důležité, a tento stav prvku je časově ohraničen.

Kvalifikace modelu určení vhodnosti pojmového modelu související s účelem použití v realitě.

Verifikace modelu je ověření, že model dostatečně zobrazuje systém jak z hlediska chování tak i struktury.

Validace modelu vyjadřuje vlastnost s chováním modelu a zkoumaného systému. Zjištění zda je model věrohodný v daných podmínkách a chová se stejně jako sledovaný originál.

Na následujícím obrázku 2.2 je uveden vývojový diagram simulačního projektu sloužící pro rozhodování vhodnosti modelu a jeho následných kroků při postupu.



⁷Obr. 2.2 – Vývojový diagram simulačního projektu

⁷KŮS Z., GLOMBÍKOVÁ V., HALASOVÁ A. *Simulace výrobních systémů – díl 1*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. 2002. ISBN 55-082-02.

2.2.2 Witness

Witness je přední software vytvořený britskou společností Lanner Group Ltd., sloužící k simulaci a optimalizaci výrobních, obslužných a logistických systémů. Využívá se k sledování interaktivní simulace u systémů obsahující diskrétní události. V ČR produkt Witness distribuuje společnost DYNAMIC FUTURE s.r.o.

Program Witness umožňuje modelovat pracovní prostředí a simulovat důsledky různých rozhodnutí. Použitím tohoto programu dosáhneme výsledku, že navržené řešení je správné, ještě předtím, než je přistoupeno k jeho realizaci. Systém Witness se v současnosti používá po celém světě od malých až po celosvětově známé společnosti.

Witness rozdělujeme do dvou verzí podle oblastí jejich použití:

1. pro oblast výroby a logistiky je to verze „**Manufacturing Performance Edition**“,
2. pro oblast služeb je to verze „**Service and Process Performance Edition**“.

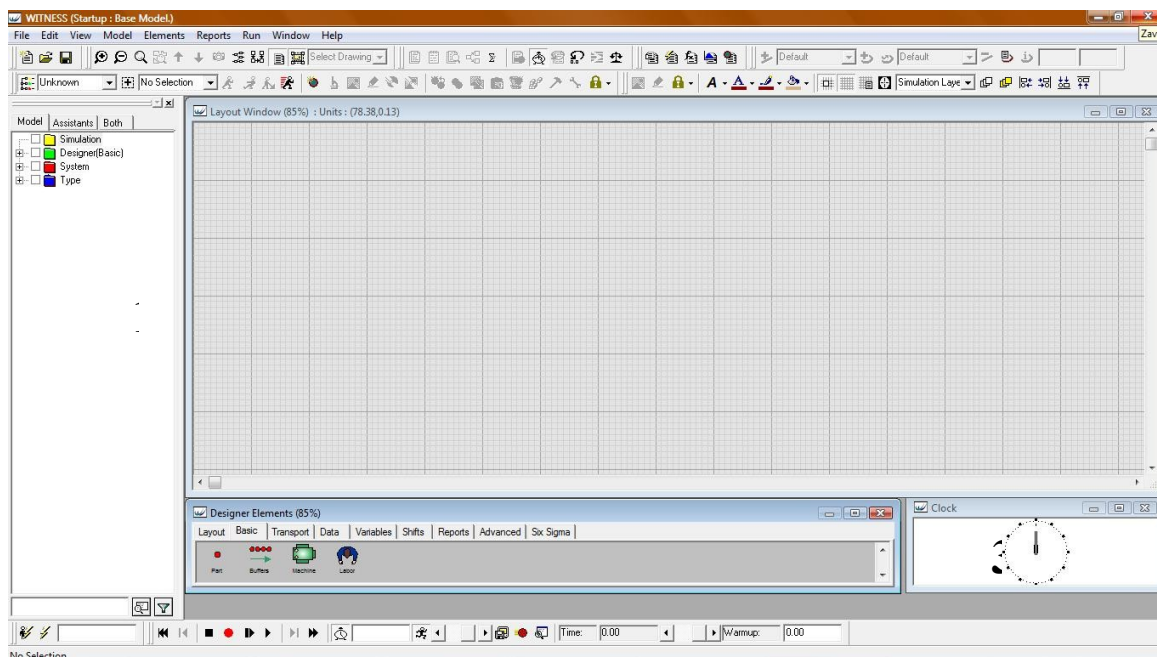
Program Witness využívá standardů operačního systému Windows. Jádro systému Witness se doplňuje moduly pro optimalizaci procesů, návrh a vyhodnocení experimentů, prezentaci výsledků simulace, zobrazení v prostředí virtuální reality, výměnu informací mezi nástroji WITNESS a Microsoft VISIO, propojení s CAD/CAM systémy, dokumentaci modelů a získávání znalostí z rozsáhlých souborů dat. Grafické prostředí Witnessu je velmi přehledné a uzpůsobené pro rychlou orientaci a snadné používání k vytváření simulačních systémů.

⁸Okno programu se skládá ze čtyř základních grafických částí a to:

1. okno pro přehled elementů vystupujících v simulaci,
2. paleta předdefinovaných prvků, pro tvorbu simulačního modelu,
3. simulární čas,
4. grafické prostředí samotného modelu.

⁸MATUŠ, Jiří. *Simulační model provozu na traťovém úseku*. 2009. 82 s. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí diplomové práce Ing. Dušan Teichmann, Ph.D. [cit. 2012-02-05].

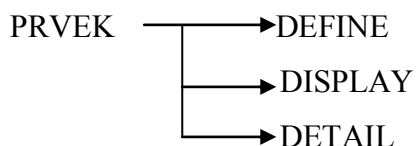
Grafické prostředí programu je uvedeno na obr. 2.3.



Obr. 2.3 – Grafické prostředí programu Witness

2.2.3 Obecná stavba modelu

Simulační model v programu Witness se tvoří ze tří základních kroků. Na samotném začátku provedeme pojmenování modelu, případně jeho zkratky a jméno tvůrce. Poté začínáme modelovat každý element v následujících krocích:



DEFINE zde můžeme jednotlivým elementům přiřadit názvy (jména) a množství (pokud je známe) se kterými budeme v simulačním modelu pracovat. Vybráním daného typu prvku napodobujeme reálný prvek, který svými vlastnostmi a funkcemi odpovídá daným prvkům simulačního obrazu.

DISPLAY pomocí tohoto kroku danému prvku přiřazujeme grafický obraz. Spolu s tímto obrazem můžeme zároveň zobrazit název prvku, v libovolné barvě a velikosti. Ikony vybíráme buď předem nadefinované pro jednotlivé typy prvků, nebo si můžeme vytvořit nové vlastní ikony v editoru ikon. V průběhu simulace se může měnit stav prvku. S tím také souvisí barva ikony, která může být stálá nebo proměnná. Tyto barvy, které zobrazují jednotlivé stavy prvků, jsou popsány buď v manuálu, nebo jsou zobrazovány formou klíče přímo na obrazovce počítače.

DETAIL jeden z nejdůležitějších kroků v rámci definování našeho modelu, pomocí kterého můžeme detailně popsat parametry jednotlivých elementů, které jsou použity v modelu a chování v simulaci. Každý element ať už (fyzický nebo logický) má přiřazen svou kartu s přehledným menu, obsahující jednotlivá podokna pro zadání požadovaných vlastností a funkcí prvku. U fyzických elementů se objevuje navíc možnost volby logických elementů, které přímo ovlivňují jejich činnost.

2.3 Teorie hromadné obsluhy

Simulační model, který je sestavován v simulačním programu Witness představuje systém hromadné obsluhy. Proto si v této kapitole stručně probereme tuto teorii. Se vznikem teorie hromadné obsluhy je spojen matematik Agner Krarup Erlang (1878-1929), který pocházel z Dánska. Začátkem 20. století řešil pro firmu Copenhagen Telephone problém související s velkým množstvím telefonních hovorů, u kterých se prodlužovala doba čekání na vyřízení. Proto se tento matematik zabýval zkrácením doby vyřizování telefonních hovorů a tímto dal podnět ke vzniku budoucí disciplíny nesoucí název teorie hromadné obsluhy.

Systém hromadné obsluhy znázorňuje systém ať už (fyzický, společenský), jehož hlavním cílem je uspokojení potřeb potenciálních jedinců, zákazníků, kteří vstupují do tohoto systému s určitými požadavky. V systému hromadné obsluhy se nachází vstupní linka, do které tito potencionální zákazníci vstupují a kanály obsluhy ve kterých se realizují požadavky zákazníka. Mohou nastat případy, kdy se v systému objeví fronta. Důvod

vzniku fronty je v důsledku čekání zákazníka na obsluhu, protože obslužný kanál dlouho zpracovával požadavek předchozího zákazníka.

Zákazníci, jednotky, požadavky jsou objekty obsahující objednávku, se kterou vstupují do systému za účelem jejího uspokojení. Mohou přicházet jednotlivě nebo ve skupinách.

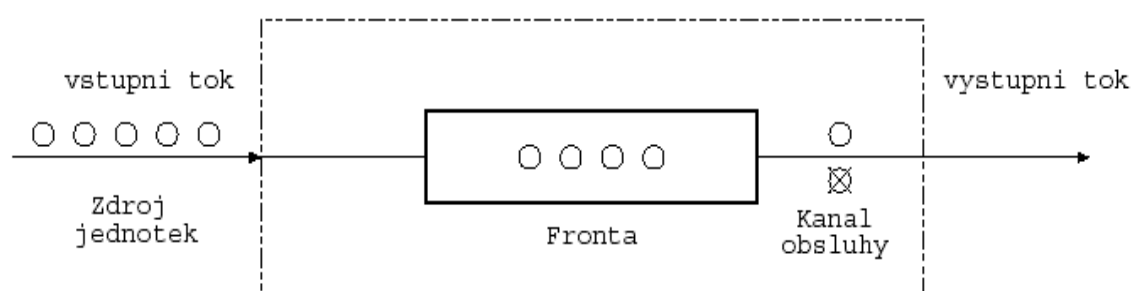
Zdroj požadavků znamená příchod požadavků, jež můžeme popsat dvěma způsoby a to jako počet požadavků přicházející za časovou jednotku (intenzita příchodů) a čas mezi dvěma po sobě následujícími příchody (interval mezi příchody).

Vstupní tok je příchod jednotek vstupujících do systému v náhodných časech a doba mezi příchody jednotlivých jednotek je náhodná veličina.

Fronta počet jednotek čekajících ve frontě na obsluhu.

Kanál obsluhy tvoří obslužné zařízení nebo linky realizující obsluhu. Obsahuje jeden nebo několik kanálů, zapojených paralelně a tvořící uzel obsluhy.

Na následujícím obrázku si ukážeme základní schéma systému hromadné obsluhy, který je tvořen dvěma kanály a obsahuje vstupní tok, který je zároveň zdrojem jednotek, frontu, kanál obsluhy a výstupní tok.



⁹Obr. 2.4 – Systém hromadné obsluhy

⁹KÚS Z., GLOMBÍKOVÁ V., HALASOVÁ A. *Simulace výrobních systémů – díl 1*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. 2002. ISBN 55-082-02.

¹⁰Systémy hromadné obsluhy je možné dělit podle několika hledisek do různých skupin a to např.:

Systémy:

- bez fronty,
- tvořící frontu.

Systémy tvořící frontu lze rozdělit na systémy s:

- neomezenou délkou fronty,
- omezenou délkou fronty.

Systémy tvořící frontu lze dále rozdělit podle frontového režimu na:

- FIFO v pořadí v jakém přišli (First in – First out),
- LIFO v opačném pořadí (Last in – First out),
- PRI podle priorit,
- SIRO v náhodném pořadí.

Systémy s řazenými linkami:

- paralelně,
- sériově,
- kombinovaně.

Systémy s linkami:

- spolehlivými,
- nespolehlivými.

¹⁰DORDA M., *Kvantitativní metoda a organizace řízení I – Teorie hromadné obsluhy*. [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava. [cit. 2012-03-01]. Dostupné na WWW: <http://homel.vsb.cz/~dor028/Hromadna_obsluha.pdf>. s. 23.

¹¹Systémy hromadné obsluhy se pro názornost označují podle:

- Kendallový klasifikace: $a / b / c$
- Rozšířené klasifikace: $a / b / c / d / e / f$

kde:

a ...typ vstupu,
 b ...typ obsluhy,
 c ...počet kanálů,
 d ...disciplína čekání,
 e ...omezení délky fronty,
 f ...omezení vstupního proudu,

a symboly použité pro označení a , b jsou:

D...deterministický vstup nebo obsluha,
M...exponenciální rozdělení,
N...normální rozdělení,
U...rovnorné rozdělení,
G...obecné rozdělení,
 E_k ...Erlangovo rozdělení k -tého řádu.

¹¹KŮS Z., GLOMBÍKOVÁ V., HALASOVÁ A. *Simulace výrobních systémů – díl 1*. Liberec:Technická univerzita v Liberci. 2002. ISBN 55-082-02.

3 Analýza vstupních dat

Simulaci tramvajové dopravy byla provedena v rámci MHD provozované Dopravním podnikem Ostrava a.s. na jednokolejně trati, mezi zastávkami Svinov mosty horní zástavka a Nová Ves vodárna. Provoz bude simulován, jak ve směru do centra města, tak i ve směru na Porubu. Při obvyklém provozu je tramvajová doprava v tomto úseku provozována po dvoukolejně trati.

Důvodem změny organizace tramvajové dopravy, tedy přechod z dvoukolejné tratě na jednokolejnou, je důsledkem uzavření Svinovských mostů, které procházejí rekonstrukcí. Tramvajová trať spojující městskou část Poruba s centrem města Ostravy patří mezi nejdůležitější a nejvytíženější spojení v Ostravě. Na této trati je provozováno Dopravním podnikem Ostrava a.s. celkem 7 tramvajových linek. Jsou to tramvajové linky číslo 3, 4, 7, 8, 9, 17 a 19.

3.1 Technické parametry tratě

Při provozu na dvoukolejně trati byla maximální povolená traťová rychlost $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Při provozu po jednokolejně trati je maximální povolená traťová rychlost $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Délka jednokolejné trati je 320 metrů. Tramvajová zastávka Svinov mosty h.z. byla pro oba směry přesunuta před Svinovské mosty ve směru na Porubu. Zastávky jsou opatřeny nástupištěm. Na nástupiště mohou vjet maximálně dvě tramvajové soupravy za sebou. Délka nástupiště je 65 metrů. Vjezd resp. výjezd z jednokolejné trati je zabezpečen samovratnými výhybkami. Délka výhybky je 15 metrů. Rychlost tramvaje z výhybky po přímém směru je $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ do výhybky po přímém směru $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Rychlost tramvaje z výhybky po odbočce je $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ do výhybky po odbočce $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

3.2 Organizace tramvajové dopravy

Jízda tramvají po jednokolejném úseku je pomocí systému, který je plně automatický, založený na detekci soupravy přijímačem. Tento přijímač je umístěn před návěstidlem ve směru do Poruby a před zastávkou Svinov mosty h.z. ve směru do centra města. Registrace vozidla je detekována rozsvícením indikátoru. Pokud se detekce vozidla nachází v poruše, probíhá přihlášení vozidel na jednokolejný úsek ručně. Nastane-li mimořádná situace, která vyžaduje průjezd více, než dvou resp. tří vlaků v jednom směru provoz se řídí ručně pomocí pracovníků dopravního podniku. Tito pracovníci mají své stanoviště na obou koncích jednokolejné trati. Automatická i ruční detekce vozidel je mimo provoz a samotný provoz je řízen ze stanoviště, které se nachází na Porubské straně jednokolejné trati.

Při poruše světelných návěstidel není možné jimi řídit provoz. Provoz je řízen povolenkami, které vydává obsluha nacházející se na jednokolejné trati. Používají se povolenky dvojího typu a to povolenka pro 1. vlak a povolenka pro poslední vlak. Pokud projíždí jednokolejným úsekem pouze jeden vlak, obdrží řidič obě povolenky.



¹²Obr. 3.1 – Registrace vozidla

Návěstidla zobrazují dva signály a to signál:

- **volno** tramvaj může pokračovat v jízdě



¹³Obr. 3.2 – Volno

^{12,13}Dostupné z WWW: <http://www.mhd-ostrava.cz/index.php?s=zabezpeceni_svinov_mosty>

- **stůj** tramvaj nesmí pokračovat v jízdě



¹⁴Obr. 3.3 – Stůj

Ve směru do centra města umožňuje návěštní zařízení průjezd max. 3 souprav za sebou. Další soupravu ve směru do centra města povolí, až jedna celá souprava opustí výhybku na druhém konci jednokolejné trati. Ve směru na Porubu umožňuje návěštní zařízení průjezd max. 2 souprav. Odepisovací smyčka, kdy může začít průjezd další soupravy po jednokolejné trati je za nástupištěm zastávky Svinov mosty h.z.

Vzhledem k provozu po jednokolejné trati řízené kyvadlově vznikají delší prostoje tramvají před signalizačním zařízením a snížením traťové rychlosti dochází k prodlužování jízdny doby tramvají. Tímto vzniká zpoždění příjezdu tramvají do zastávek Nová Ves vodárna a Svinov mosty h.z.

3.3 Dopravní průzkum

Provedený dopravní průzkum probíhal v úterý dne 13. 3. 2012 mezi 14:00 – 15:00 hodinou pro oba směry. Tento čas byl zvolen z důvodu probíhající přepravní špičky a tím získání většího množství naměřených dat. Při praktickém měření jsem se snažil co nejdetailněji zaznamenat a zachytit průběh řízení tramvajové dopravy na jednokolejném úseku, tak aby sestavený simulační model co nejvíce napodoboval reálný průběh tramvajové dopravy na jednokolejném úseku.

¹⁴Dostupné z WWW: <http://www.mhd-ostava.cz/index.php?s=zabezpeceni_svinov_mosty>

Měřené charakteristiky, které byly v průběhu průzkumu sledovány:

- časový okamžik příjezdu tramvají před signalizační zařízení,
- časový okamžik vpuštění tramvají ve směru na jednokolejnou trať,
- délka fronty před signalizačním zařízením,
- zdržení tramvají čekajících ve frontě.

Časové okamžiky příjezdu tramvají před signalizační zařízení v obou směrech byly zaznamenávány po minutových intervalech. V tab. 3.1 je zobrazena část tabulky příjezdu tramvají pro směr centrum.

Tab. 3.1 – Příjezdy tramvají ve směru na centrum

Časový interval	Čas příjezdu tramvaje
14:00 – 14:01	14:00:18
14:01 – 14:02	-
14:02 – 14:03	14:02:32
14:03 – 14:04	-
14:04 – 14:05	14:04:10
14:05 – 14:06	14:05:21
14:06 – 14:07	-
14:07 – 14:08	14:07:04, 14:07:35

Časový okamžik vpuštění tramvají v obou směrech na jednokolejnou trať byl zaznamenáván čas odjezdu tramvají a jejich počet. Ve směru na centrum to mohly být max. 3 tramvajové soupravy a ve směru na Porubu max. 2. Ukázka naměřených časových okamžiků vpuštění tramvají ve směru na Porubu je v tab. 3.2.

Tab. 3.2 – Vpuštění tramvají ve směru na Porubu

Čas	Počet tramvají [-]
14:00:20	1
14:02:25	1
14:02:45	1
14:04:20	1
14:05:42	1

Délka fronty neboli počet souprav ve frontě před signalizačním zařízením byla zaznamenávána po půlminutových intervalech. Část naměřených počtu souprav ve frontě ve směru na centrum je uvedena v tab. 3.3.

Tab. 3.3 – Počet souprav ve frontě ve směru na centrum

Čas	Počet tramvají [-]
14:00:30	1
14:01:00	1
14:01:30	0
14:02:00	0
14:02:30	0
14:03:00	1
14:03:30	1
14:04:00	0
14:04:30	1
14:05:00	1

Tab. 3.4 – Průměrné délky front

Směr Poruba [-]	Směr centrum [-]
0,575	0,71

Zdržení tramvaje ve frontě bylo vypočítáno z rozdílu času příjezdu tramvaje a času vpuštění na jednokolejnou trať. Doba zdržení tramvaje ve frontě je udávána v sekundách. Výřez dob zdržení tramvají ve směru na Porubu je v tab. 3.5.

Tab. 3.5 – Doby zdržení tramvají ve frontě ve směru na Porubu

Příjezd tramvají	Vpuštění tramvají	Čas zdržení [s]
14:00:05	14:00:20	15
14:01:04	14:02:25	81
14:02:45	14:02:45	0
14:03:15	14:04:20	65
14:05:30	14:05:42	12
14:07:28	14:08:20	52
14:09:40	14:11:00	80

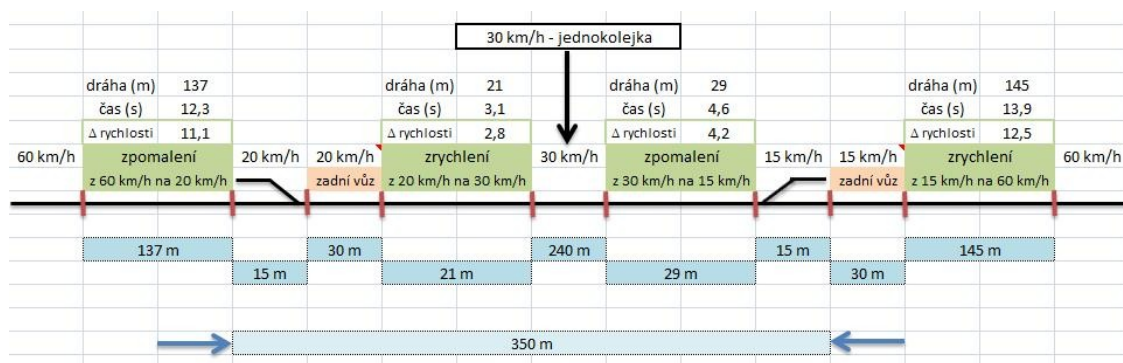
Tab. 3.6 – Průměrné zdržení tramvají ve frontě

Směr Poruba [s]	Směr centrum [s]
60,08	72,33

Pro sestavení simulačního modelu je nutno jednokolejný úsek rozdělit na tři souměrné části a spočítat dobu jízdy tramvaje jednotlivými úseky. K výpočtu poslouží schéma jednokolejného úseku pro oba směry. Doba jízdy tramvaje jednotlivými úseky nebude pro oba směry konstantní. Je to dáno jízdou tramvaje, která může projíždět úsek po přímém směru nebo po odbočce, kde max. povolená rychlost přes výhybky je pro oba případy různá. Celková délka jednokolejného úseku je 320 metrů. Souměrná délka jedné části úseku je 106,6 metrů.

Směr Poruba

- ÚSEK 1 – 15 s
- ÚSEK 2 – 12,79 s
- ÚSEK 3 – 14 s

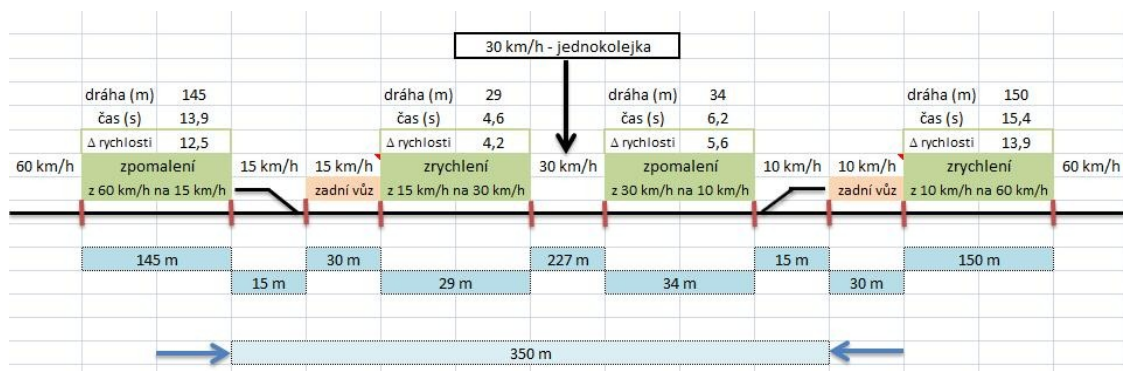


¹⁵Obr. 3.4 – Schéma jízdy tramvaje ve směru Poruba

Směr centrum

- ÚSEK 1 – 14,92 s
- ÚSEK 2 – 12,79 s
- ÚSEK 3 – 17,45 s

¹⁵Ing. Hackenberg Robert – Dopravní podnik Ostrava a.s.



¹⁶Obr. 3.5 – Schéma jízdy tramvaje ve směru centrum

3.4 Pearsonův χ^2 test dobré shody

Pro naměřená data se provede otestování pomocí testu statistických hypotéz. Testů statistických hypotéz existuje celá řada. Pro svou práci jsem si vybral test, který umožňuje otestovat, že data získaná náhodným výběrem pocházejí z populace řídicí se určitým teoretickým rozdělením s příslušnými parametry.

Byly sledovány počty přijíždějících tramvají za 1 minutu ve směru na centrum a Porubu. Ve směru na centrum přijelo celkem 37 tramvají a ve směru na Porubu 36. Provedeme otestování hypotézy, že příjezdy tramvají, za 1 minutu v obou směrech před signalizační zařízení se řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti. Hladina významnosti je 0,05.

¹⁶Ing. Hackenberg Robert – Dopravní podnik Ostrava a.s.

Výsledky sledování:

Směr centrum

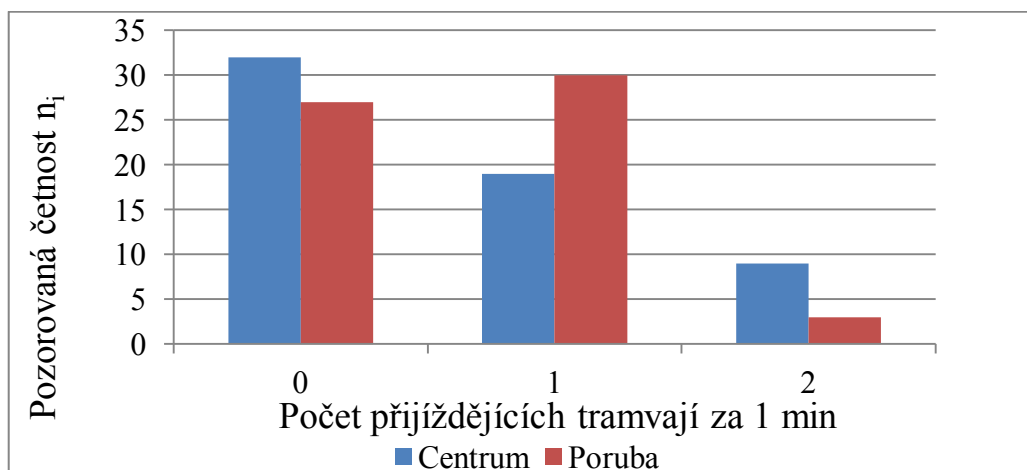
Tab. 3.5 – Počet tramvají před signalizačním zařízením směr centrum

Počet tramvají před signalizačním zařízením	Počet případů
0	32
1	19
2	9

Směr Poruba

Tab. 3.6 – Počet tramvají před signalizačním zařízením směr Poruba

Počet tramvají před signalizačním zařízením	Počet případů
0	27
1	30
2	3



Graf 3.1 - Histogram přijíždějících tramvají za 1 min

Pro specifikování nulové a alternativní hypotézy, potřebujeme nejdříve zjistit odhad na základě výběru hodnoty parametru Poissonova rozdělení λ . Tento odhad provedeme pomocí metody maximální věrohodnosti. Výpočet vypadá takto:

Směr centrum:

$$\hat{\lambda} = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n n_i \cdot v_i = \frac{1}{60} \cdot (0 \cdot 32 + 1 \cdot 19 + 2 \cdot 9) = 0,616 \text{ tramvají/min}$$

kde: $\hat{\lambda}$...parametr Poissonova rozdělení,

\bar{x} ...výběrový průměr,

n...rozsah souboru, n = 60,

n_i ...pozorovaná četnost,

v_i ...váha pozorované četnosti.

Směr Poruba:

$$\hat{\lambda} = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n n_i \cdot v_i = \frac{1}{60} \cdot (0 \cdot 27 + 1 \cdot 30 + 2 \cdot 3) = 0,6 \text{ tramvají/min}$$

Provedli jsme odhad parametru rozdělení a můžeme specifikovat obě hypotézy:

Směr centrum:

- H_0 – počet přijíždějících tramvají za 1 minutu pochází z Poissonova rozdělení s parametrem $\lambda=0,616$ tramvají/min.
- H_1 – počet přijíždějících tramvají za 1 minutu nepochází z Poissonova rozdělení s parametrem $\lambda=0,616$ tramvají/min.

Směr Poruba:

- H_0 – počet přijíždějících tramvají za 1 minutu pochází z Poissonova rozdělení s parametrem $\lambda=0,6$ tramvají/min.
- H_1 – počet přijíždějících tramvají za 1 minutu nepochází z Poissonova rozdělení s parametrem $\lambda=0,6$ tramvají/min.

Pro testovou statistiku platí:

$$G = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n \cdot \pi_{0,i})^2}{n \cdot \pi_{0,i}} \rightarrow \chi_{k-h-1}^2,$$

kde: k... počet variant proměnné,
n... rozsah souboru,
 n_i ... počet pozorování v i-té třídě (pozorované četnosti),
 $n \cdot \pi_{0,i}$... pozorované (teoretické) četnosti,
h... počet odhadovaných parametrů rozdělení.

Pozorované četnosti známe, zbývají nám stanovit četnosti teoretické.

Výpočet relativní teoretické četnosti $\pi_{0,i}$ dosazené do pravděpodobnostní funkce Poissonova rozdělení:

Pro směr centrum:

$$\pi_{0,1} = P(X = 0) = \frac{0,616^0}{0!} \cdot e^{-0,616} = 0,54$$

$$\pi_{0,2} = P(X = 1) = \frac{0,616^1}{1!} \cdot e^{-0,616} = 0,33$$


$$\pi_{0,3} = P(X \geq 2) = 1 - P(X < 2) = 1 - \sum_{i=1}^2 \pi_{0,i} = 0,13$$

Tab. 3.7 – Výsledky četností pro směr centrum

Třída	Varianta proměnné v_i	Pozorovaná četnost n_i	Teoretická relativní četnost $\pi_{0,i}$	Teoretická četnost $n \cdot \pi_{0,i}$
1	0	32	0,54	32,4
2	1	19	0,33	19,9
3	2 a více	9	0,13	7,7
Σ		60	1,000	60

Tab. 3.8 – Hodnoty testové statistiky pro směr centrum

Pozorovaná četnost n_i	Teoretická četnost $n \cdot \pi_{0,i}$	$\frac{(n_i - n \cdot \pi_{0,i})^2}{n \cdot \pi_{0,i}}$
32	32,4	0,0049
19	19,9	0,0424
9	7,7	0,2268
Σ 60	60	0,6557

Vypočtená pozorovaná hodnota testové statistiky x_{obs} 

Pro směr Poruba:

$$\pi_{0,1} = P(X = 0) = \frac{0,6^0}{0!} \cdot e^{-0,6} = 0,55$$

$$\pi_{0,2} = P(X = 1) = \frac{0,6^1}{1!} \cdot e^{-0,6} = 0,33$$

$$\pi_{0,3} = P(X \geq 2) = 1 - P(X < 2) = 1 - \sum_{i=1}^2 \pi_{0,i} = 0,12$$

Tab. 3.9 – Výsledky četností pro směr Poruba

Třída	Varianta proměnné v_i	Pozorovaná četnost n_i	Teoretická relativní četnost $\pi_{0,i}$	Teoretická četnost $n \cdot \pi_{0,i}$
1	0	27	0,55	32,9
2	1	30	0,33	19,7
3	2 a více	3	0,12	7,4
Σ		60	1,000	60

Tab. 3.10 – Hodnoty testové statistiky pro směr Poruba

Pozorovaná četnost n_i	Teoretická četnost $n \cdot \pi_{0,i}$	$\frac{(n_i - n \cdot \pi_{0,i})^2}{n \cdot \pi_{0,i}}$
27	32,9	1,0515
30	19,7	5,3327
3	7,4	2,5995
Σ 60	60	8,9837

Vypočtená pozorovaná hodnota testové statistiky x_{obs} 

Nyní musíme provést stanovení kritické hodnoty testu. Hladina významnosti je $\alpha = 0,05$, celkem máme 3 třídy (k) a odhadovali jsme 1 parametr rozdělení (h), dostaneme:

$$\chi_{krit} = \chi^2_{(1-\alpha);k-h-1} = \chi^2_{0,95,1} = CHIINV(0,05; 1) = 3,841$$

Výpočtem jsme zjistili, že pozorovaná hodnota testové statistiky pro směr na centrum není vyšší než kritická hodnota testu a leží tedy v oboru přijetí a proto na hladině významnosti 0,05 nezamítáme nulovou hypotézu a můžeme tvrdit, že počet přijíždějících tramvají za 1 minutu ve směru na centrum se řídí Poissonovým rozdělením.

Hodnota testové statistiky pro směr na Porubu je vyšší než kritická hodnota testu, tudíž neleží v oboru přijetí a proto na hladině významnosti 0,05 zamítáme nulovou hypotézu a říkáme, že počet přijíždějících tramvají za 1 minutu ve směru na Porubu se neřídí Poissonovým rozdělením.

Z dosažených výsledků bylo zjištěno, že při sestavování modelu se příjezdy tramvají ve směru na centrum řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti. Pro směr na Porubu nelze použít Poissonovo rozdělení pravděpodobnosti, a proto bude nutné si nadefinovat vlastní rozdělení pravděpodobnosti v simulačním programu Witness.

4 Tvorba simulačního modelu

Simulační program Witness má v základní nabídce k dispozici předdefinované prvky pomocí kterých sestavujeme simulační model. Nejzákladnější prvky jsou čtyři. Je důležité vybrat ty správné elementy, které svými vlastnostmi budou podobné vlastnostem složek v reálných situacích a správně plnily funkce a operace, které jsou v simulačním modelu požadovány a nadefinovány.



Obr. 4.1 – Paleta základních prvků

Základní prvky jsou:

- part (součást),
- buffers (zásobník),
- machine (stroj),
- labor (pracovník).

Na obrázku palety základních prvků je možné vidět další záložky, které obsahují další předdefinované prvky, které můžeme pro tvorbu simulačního modelu použít. Mohou to být dopravníky, atributy, akce a další logické elementy, funkce, modelování směn aj.

Pro tvorbu simulačního modelu budou použity pouze tři základní prvky a to součást, zásobník a stroj.

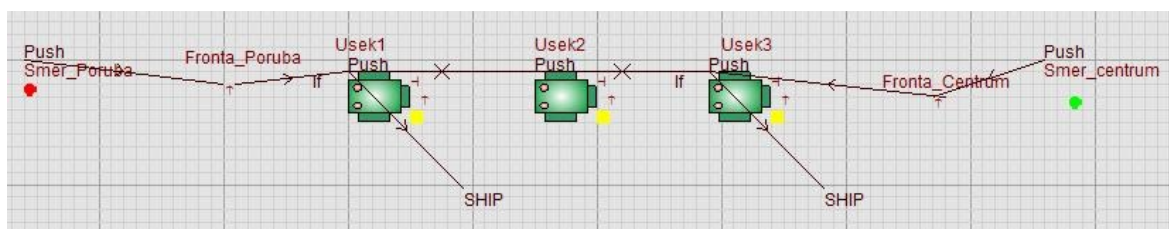
Součást představuje diskrétní jednotku, která se v simulačním modelu pohybuje a dává chod celému modelu. Součást bude reprezentovat tramvaje, které budou projíždět jednokolejným úsekem a jsou jediným pohyblivým prvkem v modelu. Příjezdy tramvají do systému jsou řízeny časovým příjezdem před jednokolejným úsekem a odjezdem na jednokolejný úsek.

Zásobník je místo v modelu, kde se tvoří fronta. V modelu bude fronta tvořena čekajícími tramvajemi na vjezd na jednokolejný úsek. Odjezd tramvaje z fronty je řízen zaznamenaným časem odjezdu.

Stroj je prvek, pracující se součástmi, které do stroje vstupují a provádí jejich obsluhu. Stroje budou v modelu prezentovány jako tři souměrné části jednokolejného úseku, kterými bude tramvaj resp. tramvaje projíždět, a budou představovat jízdní dobu tramvaje potřebnou k projetí daného úseku tratě.

V modelu bude pracováno hlavně s časovými údaji, jejichž jednotky budou v sekundách.

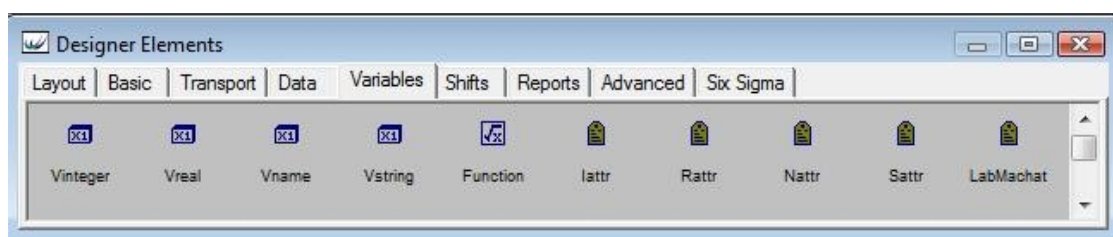
Při sestavování modelu nejprve vložíme prvky, které budou použity, a vytvoříme si základní kostru modelu. Následně provedeme spojení jednotlivých prvků pomocí vizuálních vstupních a výstupních pravidel. Pro lepší orientaci a přehlednost můžeme jednotlivé prvky modelu přejmenovat. Simulační model používá časovou jednotku 1 s.



Obr. 4.2 – Základní kostra modelu

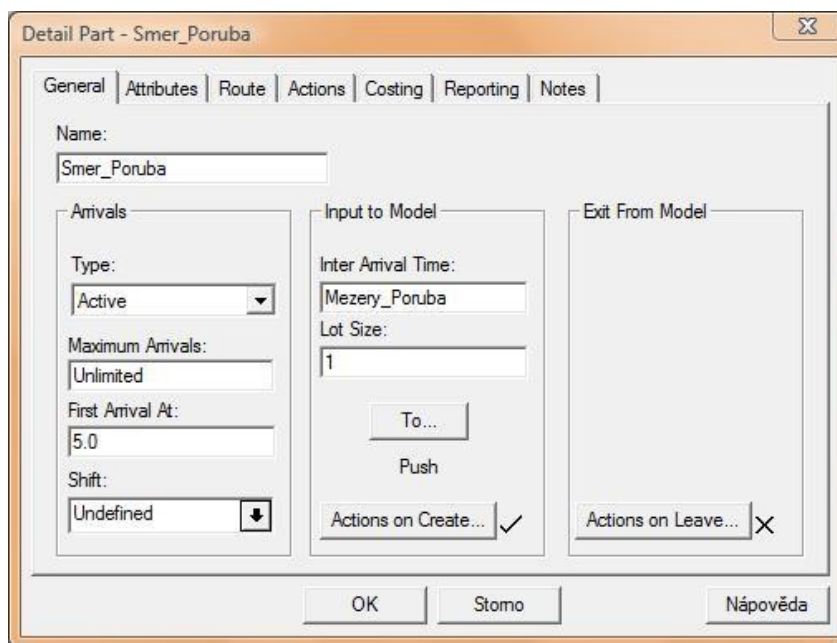
Jako první element je definována součást „*Smer_Poruba*“ a „*Smer_centrum*“ a modelují příjezdy tramvají do systému. Definování výstupních pravidel je u obou součástí shodný. První nastavení součásti je první příjezd tramvaje „*First Arrival At*“ ve

směru na Porubu, která proběhne v čase 5.0 s. Ve směru na centrum proběhne první příjezd tramvaje v čase 18.0 s. Mezery mezi příjezdy „*Inter Arrival Time*“ jednotlivých tramvají nejsou konstantní, proto je potřeba v programu MS Excel, který je kompatibilní s programem Witness, vytvořit soubor s hodnotami mezer mezi příjezdy tramvají pro směr Poruba a centrum, které zajistí jejich správný sled. Z karty předdefinovaných prvků vybereme pomocnou proměnnou „*Variables*“ a vybereme element „*Vinteger*“ což je celočíselná proměnná. Počet proměnných jsou dvě pro každý směr jedna. Jejich názvy jsou „*Mezery_Poruba*“ a „*Mezery_Centrum*“.



Obr. 4.3 – Karta pomocných proměnných „*Variables*“

Aby proběhlo správné načítání souboru mezer z MS Excelu, je nutné definovat u součástí vstup do modelu „*Input to Model*“ a k němu připadající mezery mezi příjezdy „*Inter Arrival Time*“. Pro směr Poruba to jsou „*Mezery_Poruba*“ pro směr centrum „*Mezery_Centrum*“. Na obr. 4.4 je zobrazen detail součásti pro směr Poruba.

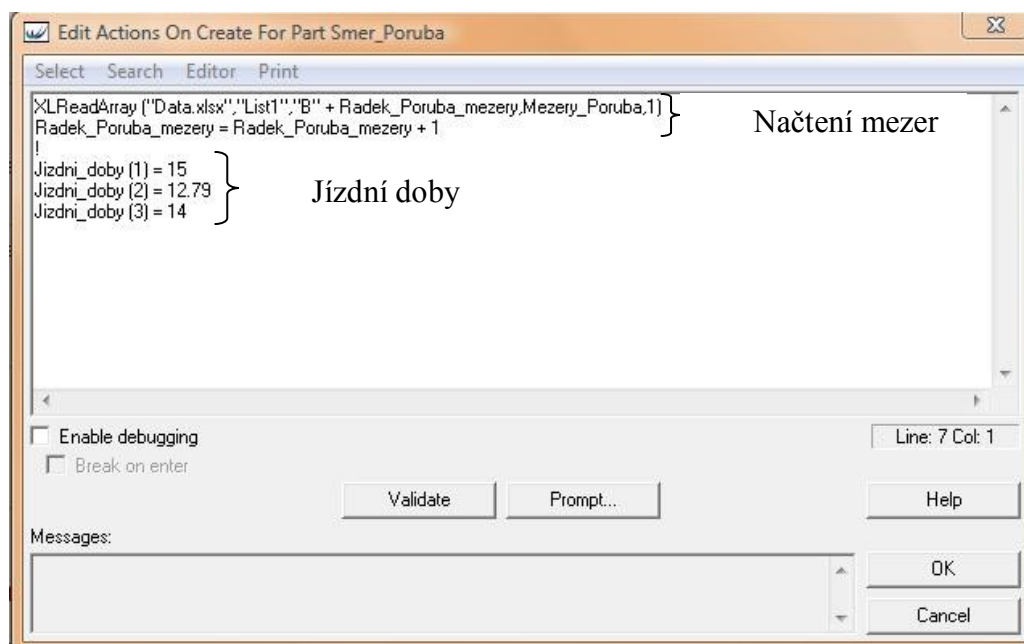


Obr. 4.4 – Detail součásti „*Smer_Poruba*“

Pro načítání souborů z MS Excel se používá funkce „*XLWriteArray*“, která má tyto parametry:

1. parametr – „*Data.xlsx*“ název souboru, ze kterého se budou načítat data.
Parametr musí mít uvozovky a jednotlivé parametry oddělujeme čárkou.
Důležité je hlídat si správnou příponu souboru.
2. parametr – „*List1*“ odkaz na list,
3. parametr – „*B2*“ odkaz na konkrétní buňku,
4. parametr – hodnotu proměnné uloží do „*Mezery_Poruba*“,
5. parametr – *1*.

Celý odkaz pro součást „*Smer_Poruba*“ je zobrazen na obr. 4.5. Je-li na začátku řádku vykřičník, pak se celý řádek bere jako komentář.

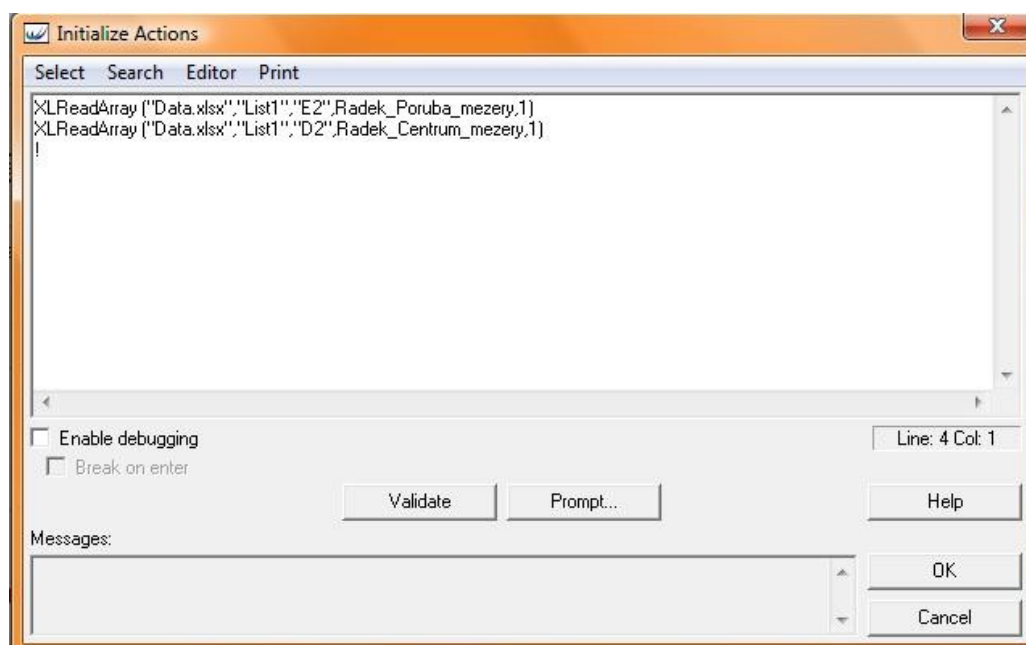


Obr. 4.5 – Vytvoření akce pro „*Smer_Poruba*“

Příkaz „*Radek_Poruba_mezery = Radek_Poruba_mezery + 1*“, zabezpečí, aby při načtení další hodnoty mezery byl použit další řádek.

Stejný odkaz platí i pro součást „*Smer_centrum*“ jen se změní odkaz na buňku a uložení proměnné bude do „*Mezery_Centrum*“.

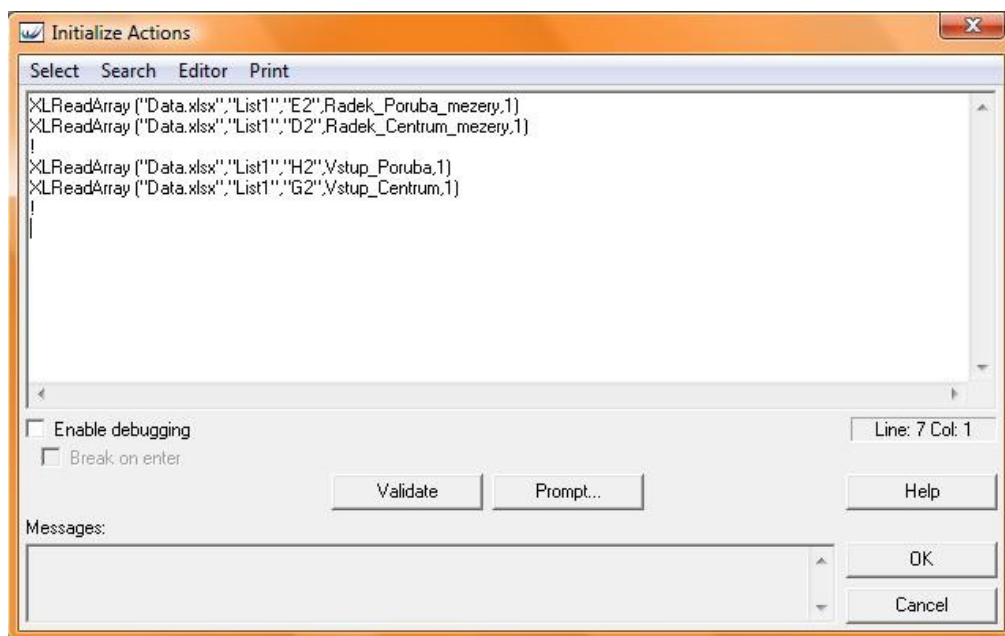
Načítání mezer mezi příjezdy tramvají je plovoucí. Pro načítání mezer vytvoříme v programu MS Excel dva zápisy a to „*Radek_Centrum*“ a „*Radek_Poruba*“, jejichž počáteční hodnota je na druhém řádku, která odpovídá počátečním hodnotám mezer mezi příjezdy. V průběhu simulace se budou měnit pouze čísla buněk. V simulačním modelu jsou tyto dva zápisy ve formě další celočíselné proměnné označené jako „*Radek_Poruba_mezery*“ a „*Radek_Centrum_mezery*“. Pro načtení řádků ze souboru MS Excel na začátku simulace se používají inicializační akce „*Intialize Actions*“, které se nachází v panelu nástrojů pod kartou „*Model*“, a vykonají se vždy na začátku simulace. Tvar odkazu viz obr. 4.6. Rozdíl v odkazech je opět jen u odkazu na buňku a uložení proměnné.



Obr. 4.6 – Inicializační akce k načtení mezer mezi příjezdy „*Radek_Poruba*“ a „*Radek_Centrum*“

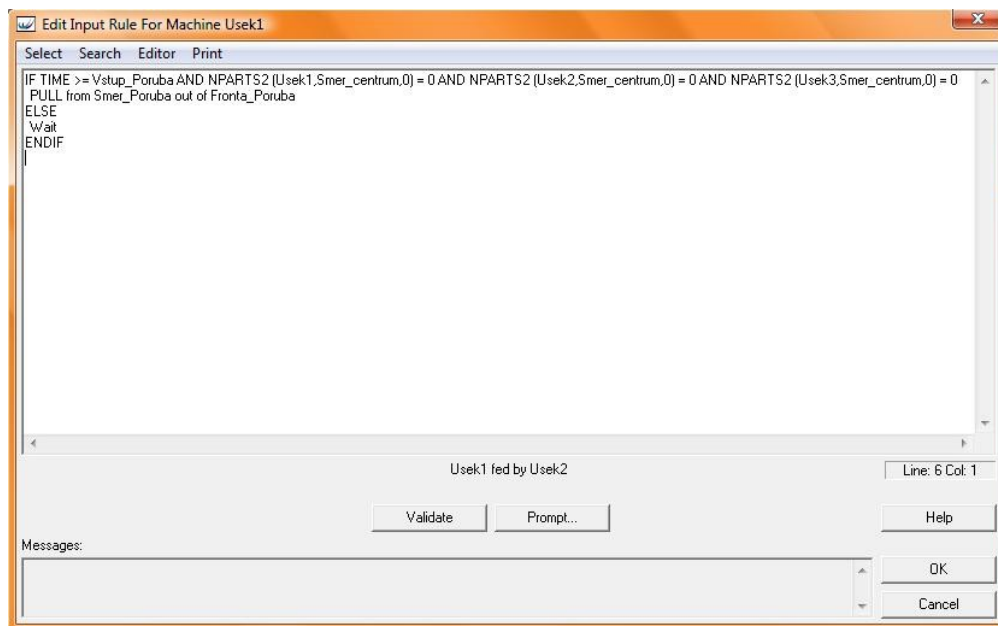
Další proměnné obsažené v simulačním modelu zaznamenávají vpuštění tramvají na jednokolejný úsek. V případech, kdy na jednokolejný úsek byly vpuštěny 2 a více tramvají za sebou, je nutné provést přepočít, tak aby na trať vjela jen jedna tramvaj. To je provedeno tak, že první tramvaj projede prvním úsekem tratě a k času odjezdu druhé tramvaje se připočte čas jízdy tramvaje v prvním úseku tratě. Názvy proměnných jsou „*Vstup_Poruba*“ a „*Vstup_Centrum*“. Bylo nutné vytvořit soubor dat v programu MS Excel, kde byly spočítány časy jednotlivých vstupů tramvají pro oba směry. Opět je

potřeba načtení inicializačních akcí pro načtení prvních vstupů. Odkaz je podobný, jako v předešlém případě, jenom je změna v odkazu na buňku a uložení proměnné viz obr. 4.7.



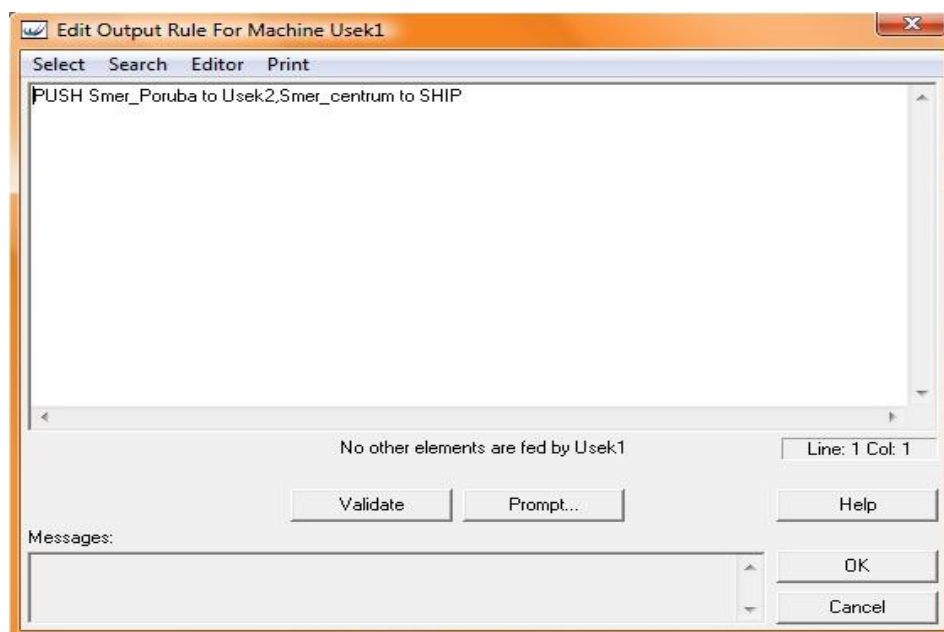
Obr. 4.7 – Inicializační akce k načtení „*Vstup_Poruba*“ a „*Vstup_Centrum*“

V dalším kroku při sestavování simulačního modelu je potřeba upravit vstupní a výstupní pravidla strojů, které představují tři souměrné části jednokolejného úseku, kterými tramvaje projíždí. Nejprve se provede upravení vstupního pravidla stroje s názvem „*Usek1*“ ve směru Poruba. Ke vstupu součásti do „*Usek1*“ směr Poruba může dojít tehdy, bylo-li dosaženo hodnoty simulárního času alespoň rovné okamžiku vstupu tramvaje a současně není jednokolejný úsek obsazen tramvají jedoucí opačným směrem. Stejný postup vstupního pravidla platí i pro „*Usek3*“, dojde jen ke změně označení směru Poruba za směr centrum. Tvar zápisu ve Witnessu pro „*Usek1*“ je zobrazen na obr. 4.8.



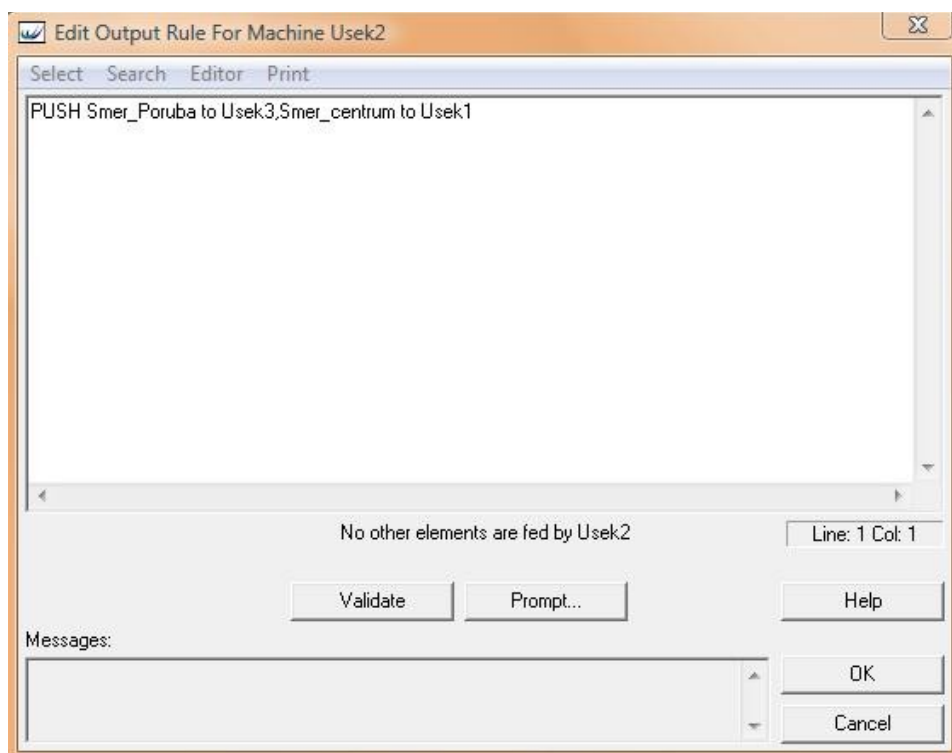
Obr. 4.8 – Vstupní pravidlo pro „Usek1“

Výstupní pravidlo pro „Usek1“ je dán pravidlem „*PUSH*“, kdy tramvaj jedoucí ve směru na Porubu pokračuje do „Usek2“ a naopak tramvaj jedoucí ve směru na centrum je posílána z modelu pryč příkazem „*SHIP*“. Výstupní pravidlo pro „Usek3“ je obdobné opět použitím pravidla „*PUSH*“, kdy tramvaj jedoucí ve směru na centrum pokračuje do „Usek3“ a tramvaj jedoucí ve směru na Porubu je posílána z modelu pryč příkazem „*SHIP*“. Detail výstupní pravidla je na obr. 4.9.



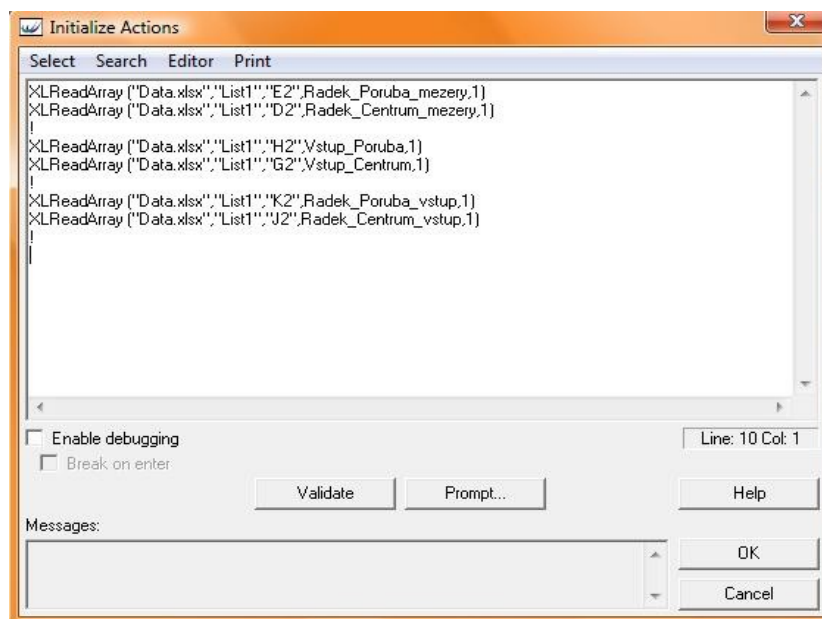
Obr. 4.9 – Výstupní pravidlo pro „Usek1“

Definování vstupního pravidla pro „*Usek2*“ je omezeno pouze na pravidlo „*Wait*“, kdy „*Usek2*“ čeká na příjezd další tramvaje. Výstupní pravidlo je dáno pravidlem „*PUSH*“, kdy tramvaj jedoucí ve směru Poruba pokračuje do „*Usek3*“ a tramvaj jedoucí ve směru centrum pokračuje do „*Usek1*“. Výstupní pravidlo pro „*Usek2*“ viz obr. 4.10.



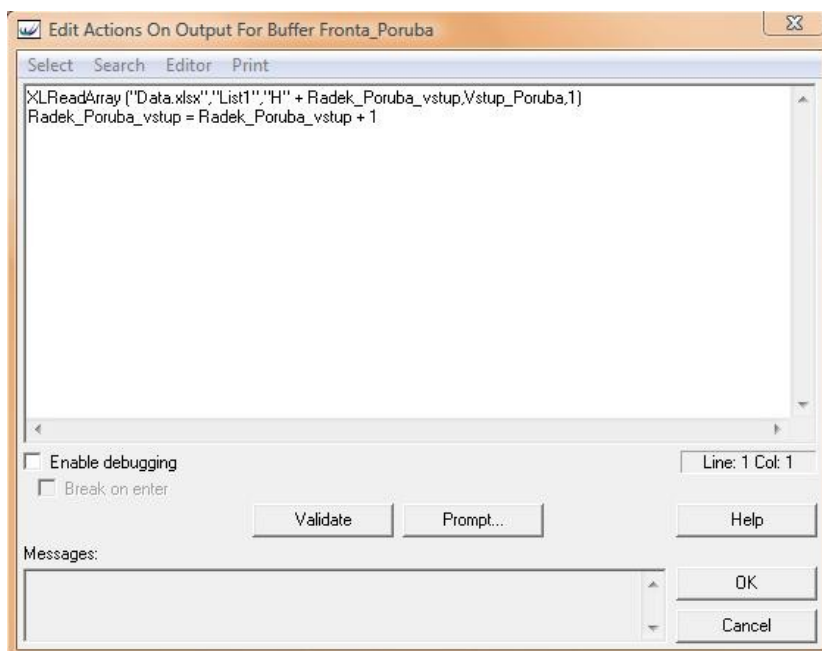
Obr. 4.10 – Výstupní pravidlo pro „*Usek2*“

Je nutné vložit do modelu další dvě proměnné, které budou načítat časy vstupů pro směr Poruba a centrum, které byly vypočítány a vytvořeny v programu MS Excel. Příkaz pro načtení souboru z Excelu je stejný jako v předchozích případech, opět se změní jen odkaz na buňku a název uložení proměnné. Detail viz obr. 4.11.



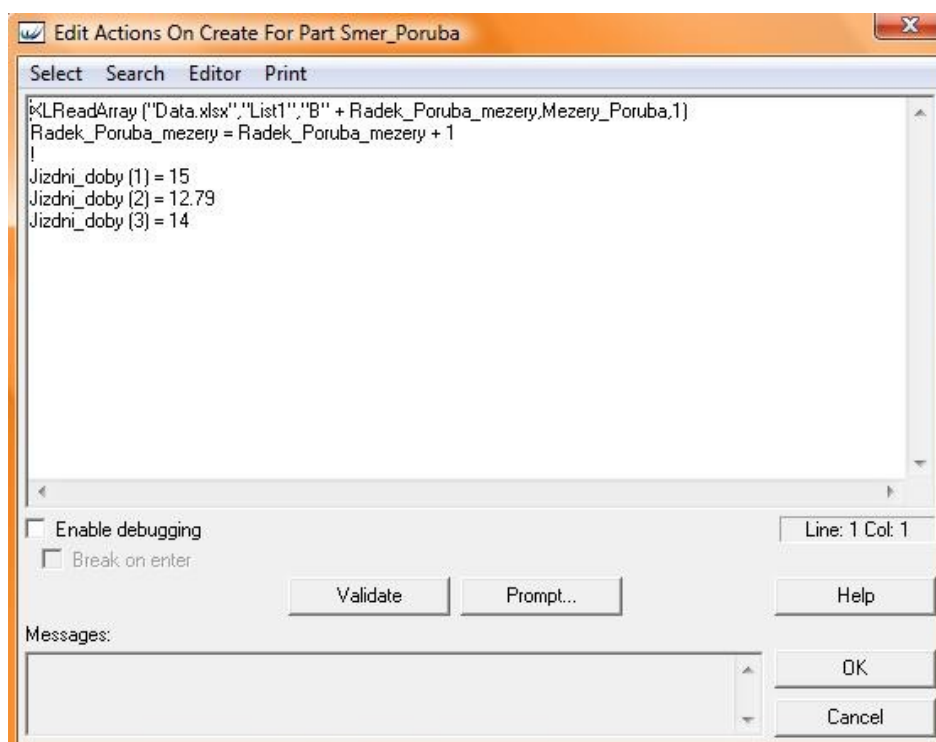
Obr. 4.11 – Inicializační akce k načtení řádků pro „*Radek_Poruba_vstup*“
a „*Radek_Centrum_vstup*“

Posledním elementem je definování zásobníků „*Fronta_Poruba*“ a „*Fronta_Centrum*“. Zde se upraví pouze akce při výstupu součástí ze zásobníku. Opět je použit příkaz pro načítání souboru z programu MS Excel. Tento příkaz zajistí, aby při dalším vstupu ve směru Poruba došlo k načtení dalšího řádku s časem vstupu další tramvaje do úseku. Obdobný příkaz se provede i pro opačný směr Centrum.



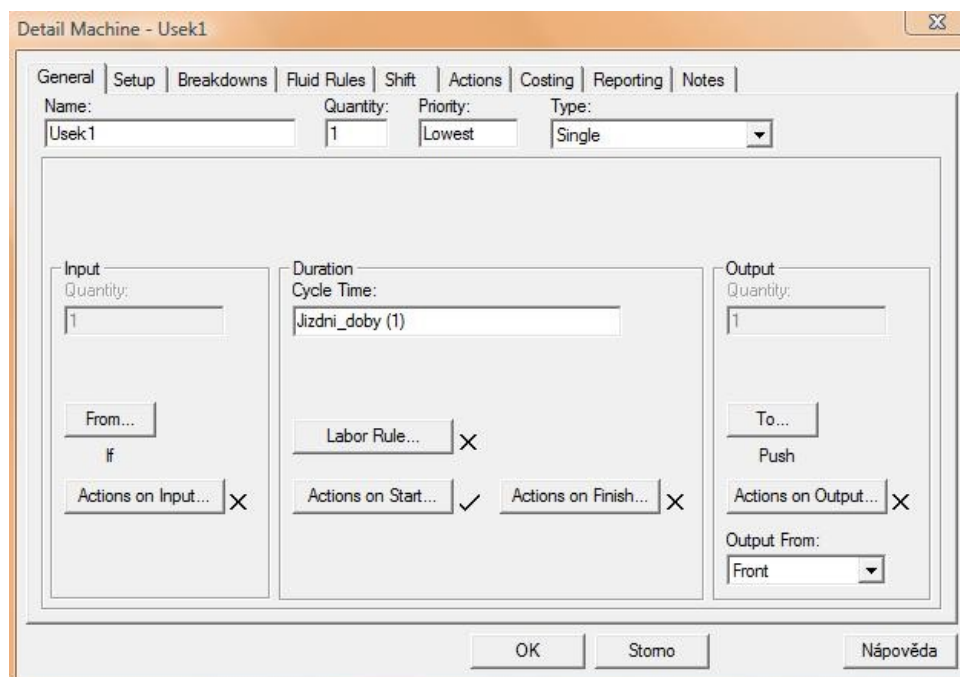
Obr. 4.12 – Výstupní akce pro „*Fronta_Poruba*“

Důležitým parametrem, který je nutno definovat, jsou jízdní doby součástí resp. tramvají. Jízdní doby jsou vytvořeny pomocí atributů. Najdeme je v kartě předdefinovaných prvků pod záložkou „Variables“ a použije se reálný atribut „Rattr“. Celkem jsou tři jízdní doby, které odpovídají třem úsekům souměrně rozdělených na jednokolejně trati. Hodnoty jízdních dob součástí jsou odlišné pro součásti Poruba a centrum, z důvodu jejich rychlosti projížděným úsekem. Jsou definovány v okně „Input to Model“ „Actions on Create“, kde přiřadíme jízdní doby konkrétní součásti.



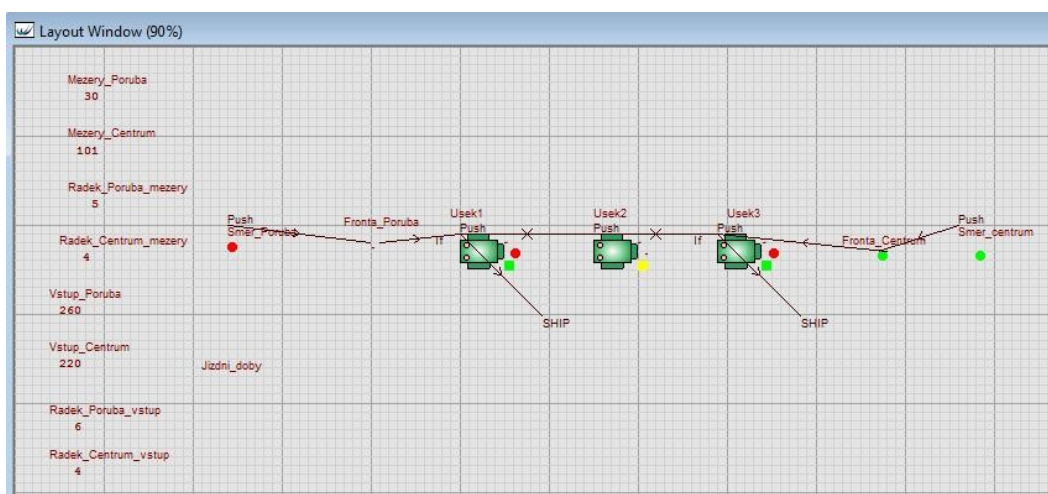
Obr. 4.13 – Jízdní doby pro součást „Smer_Poruba“

Jízdní doby je nutné použít také u všech strojů v modelu, pomocí kterých definujeme „Cycle Time“. Pro „Usek1“ bude platit „Cycle Time“ „Jizdni_doby(1)“, kde je použit čas součásti, která se v něm právě nachází.



Obr. 4.14 – Definování „Cycle Time“ pro „Usek1“

Nyní je vytvořen simulační model, na obr. 4.15, který obsahuje všechny základní prvky modelu, jsou definována potřebná vstupní a výstupní pravidla prvků a inicializační akce, které jsou nezbytně nutné pro správný chod simulačního modelu. Simulační běh má délku 3600 s. Splněním všech kroků pro konstrukci modelu je k dispozici namodelovaný systém, jehož vlastnosti jsou podobné reálnému systému. Vytvořený model tramvajové dopravy je kompletní a může být použit pro simulační experimenty. Před provedením simulačních experimentů, je nejdříve nutné funkci simulačního modelu validovat.



Obr. 4.15 – Simulační model

4.1 Validace simulačního modelu

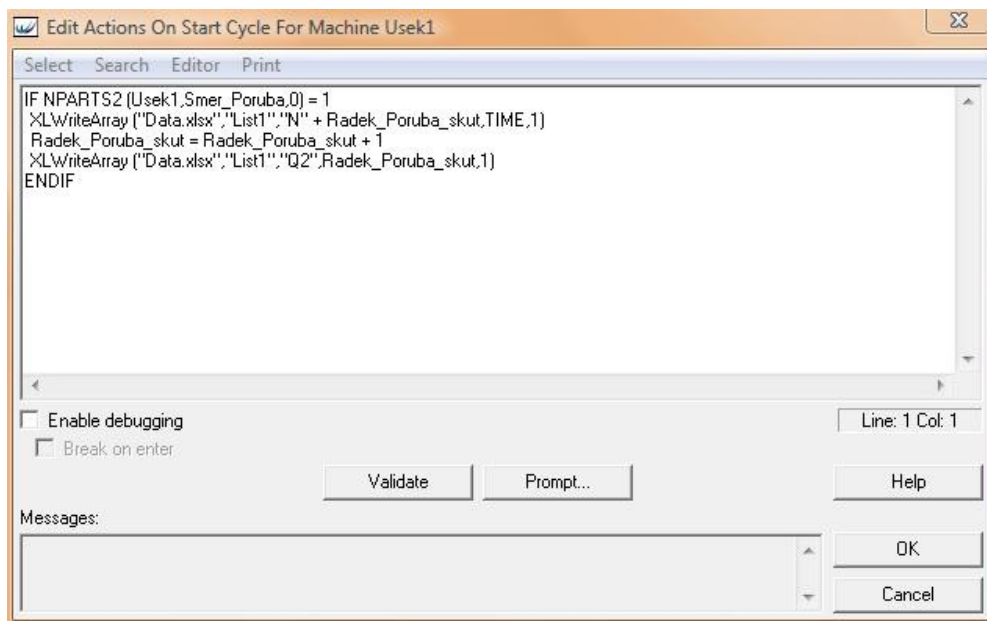
Při validaci simulačního modelu zjišťujeme, jak dobře model reprezentuje reálný systém. Validace modelu je založena na porovnávání získaných dat z reálného systému s daty získanými modelem.

Pro úspěšnou validaci sestaveného simulačního modelu je potřeba sledování simulačních výstupů. Pro sestavený simulační model se provedou tři simulační výstupy a to:

- porovnání naměřených časů vstupů se simulovanými časy vstupů, o kolik se simulované časové vstupy liší oproti naměřeným vstupům,
- porovnání průměrné délky front z provedeného měření a simulace a stanovení jejich procentuální rozdíl,
- porovnání průměrného zdržení tramvají ve frontě z měření a simulace a stanovení jejich procentuální rozdíl.

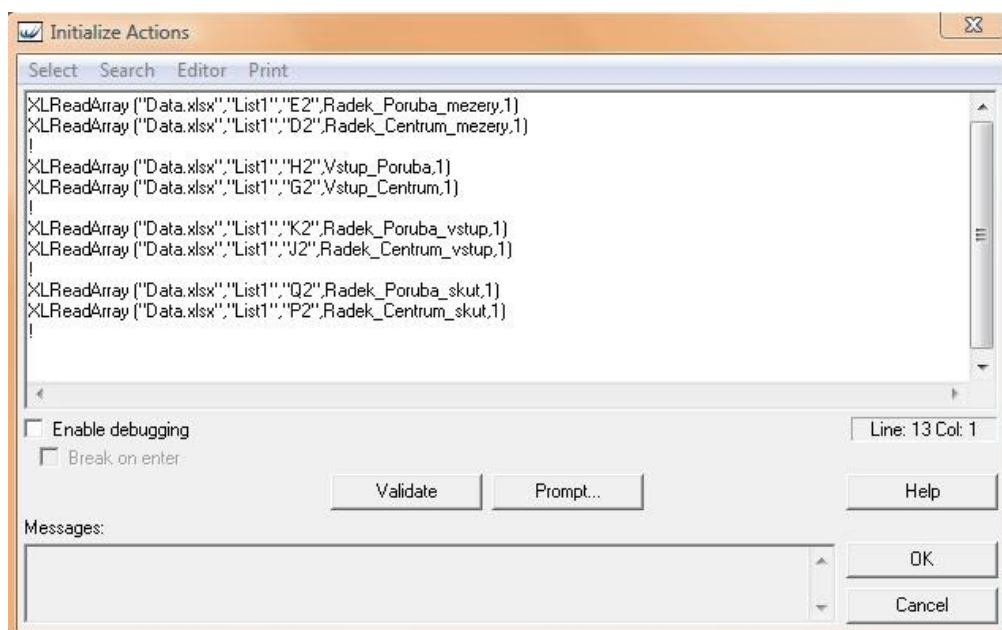
Pro porovnání časů vstupů je třeba vytvořit v programu MS Excel soubor, ve kterém se budou zapisovat jednotlivé časy simulovaných vstupů tramvají do systému. Po skončení simulačního běhu bude možné porovnat naměřené vstupy s reálnými vstupy získaných ze simulace. Aby při simulaci docházelo k zápisu času vstupu tramvaje do úseku je pro „*Usek1*“ a „*Usek3*“ nutno definovat „*Actions on Start*“ podmínkou:

„*IF NPARTS2 (Usek1,Smer_Poruba,0) = 1, XLWriteArray ("Data.xlsx","List1","N" + Radek_Poruba_skut,TIME,1)*“, která zaručuje, že když do úseku vstoupí tramvaj ve „*Smer_Poruba*“, dojde k zápisu času vstupu do úseku a navýší se hodnota pomocné proměnné a čas se zapíše do souboru v programu MS Excel. Analogicky platí stejná podmínka i pro „*Usek3*“ „*Smer_Centrum*“. Detail podmínky pro „*Usek1*“ viz obr. 4.16.



Obr. 4.16 – Podmínka simulovaného vstupu pro „Usek1“ „Smer_Poruba“

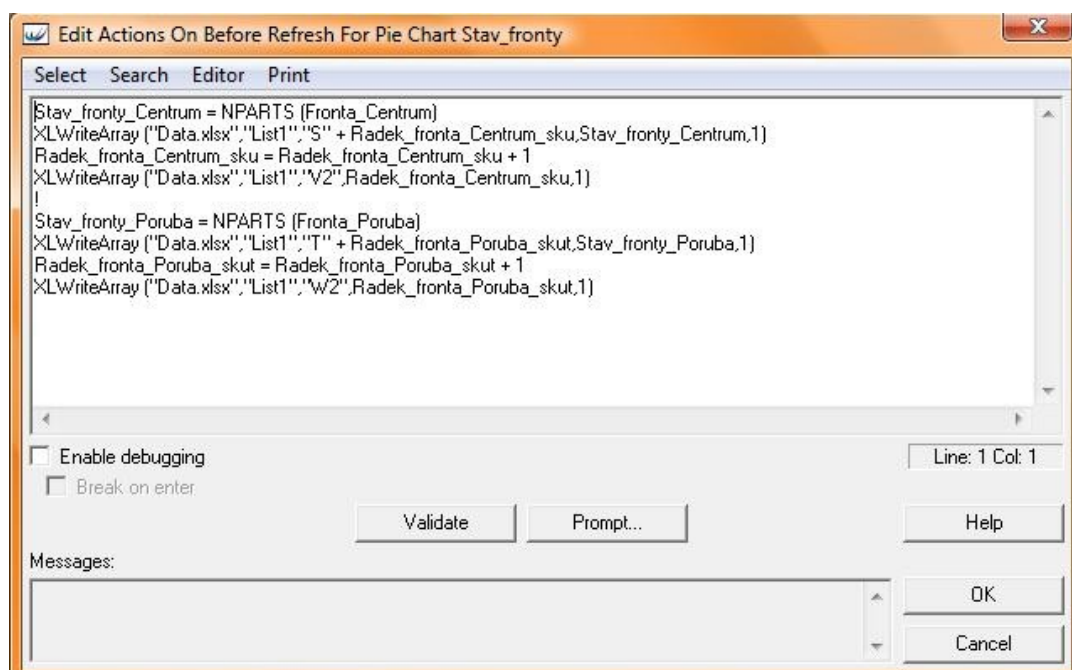
S definováním této podmínky souvisí i vytvoření nových pomocných proměnných, které nesou názvy „Radek_Poruba_skut“ a „Radek_Centrum_skut“. Pro zápis simulovaných vstupů do MS Excel je nutné vytvoření inicializačních akcí pro „Smer_Poruba“ a „Smer_Centrum“ s odkazy na list, konkrétní buňku a název pomocné proměnné, kam se uloží simulovaný vstup. Podoba inicializačních akcí viz obr. 4.17.



Obr. 4.17 – Inicializační akce pro načtení „Radek_Poruba_skut“
a „Radek_Centrum_skut“

Při druhém simulačním výstupu, kdy je porovnávána průměrná délka fronty v každém směru, je výstupem zjištění odchylky průměrné délky fronty z původních výpočtů naměřených hodnot a hodnot získaných při simulaci. Opět je zapotřebí vytvořit pomocné proměnné, které budou pomocí inicializačních akcí vytvářet v programu MS Excel soubor dat se zjištěním reálného stavu fronty s příslušným řádkem pro směr Poruba a centrum.

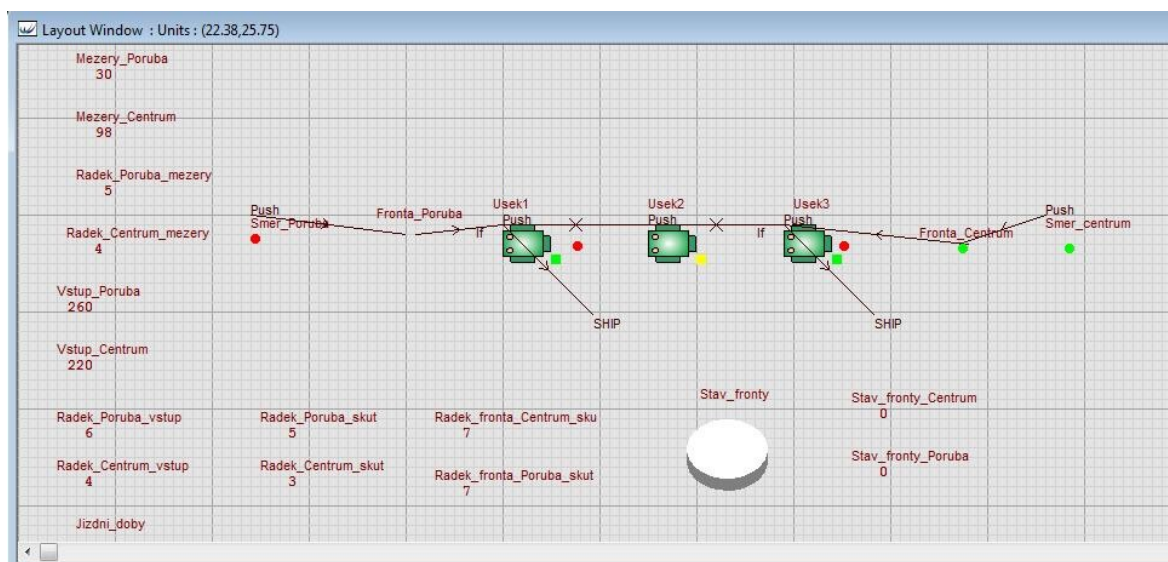
Pro zápis stavu fronty slouží koláčový graf „Pie“ s názvem „Stav_fronty“. Zápis reálného stavu front ze simulace je ukládán do programu MS Excel. K tomu slouží vytvoření pomocných proměnných „Stav_fronty_Poruba“ a „Stav_fronty_Centrum“. Pro použití dalšího řádku k zápisu stavu fronty je nutné vytvoření pomocných proměnných „Radek_fronta_Poruba_skut“ a „Radek_fronta_Centrum_sku“. Stav fronty je zaznamenáván po každých 30 s simulace pro oba směry. Počet tramvají ve frontě je zjišťován pomocí funkce „NPARTS“ a název zásobníku „Fronta_Poruba“ a „Fronta_Centrum“. Detail definování stavu fronty koláčového grafu „Pie“ je na obr. 4.18.



Obr. 4.18 – Definování koláčového grafu pro stav fronty

Po provedení všech nezbytných úkonů, které jsou potřebné pro validaci simulačního modelu, je možné ověřit, zda je sestavený model validní. Po provedení simulačního běhu

dojde k vyhodnocení simulačních výstupů a porovnání dosažených výsledků z měření a ze simulace. Upravený simulační model pro validaci viz obr. 4.19.



Obr. 4.19 – Upravený simulační model pro validaci

4.2 Porovnání simulačních výstupů v rámci validace modelu

Prvním simulačním výstupem bylo porovnání naměřených vstupů se simulovanými vstupy, o kolik se simulované časové vstupy liší oproti naměřeným vstupům. Po provedení simulačního běhu byly získány výsledky, kde prvních 10 vstupů je uvedeno v tab. 4.1.

Tab. 4.1 – Porovnání prvních 10 vstupů z měření a ze simulace

Vstup Centrum [s]	Vstup Poruba [s]	Simulovaný vstup Centrum [s]	Simulovaný vstup Poruba [s]
73	20	73	20
220	145	220	145
394	165	394	165
411	260	411,45	265,16
438	342	438	342
567	500	567	500
584	660	584,45	660
798	720	798	720
815	888	815,45	888
963	901	963	903

Získané hodnoty simulovaných vstupů jsou shodné nebo mírně větší oproti vstupům získaných z měření. Tyto malé odchylky jsou způsobené tím, že jízdní doby tramvají nejsou konstantní, např. někteří řidiči projeli úsekem rychleji, než je předpokládáno v modelu.

Druhým simulačním výstupem bylo porovnání průměrné délky front z provedeného měření a simulace a stanoven jejich procentuální rozdíl. Výsledky průměrných délek front pro oba případy a jejich procentuální rozdíly jsou zobrazeny v tab. 4.2.

Tab. 4.2 – Porovnání délky front z měření a ze simulace

Délka front	Z měření [-]	Ze simulace [-]	Rozdíl [%]
Směr Poruba	0,575	0,53	-8,45
Směr Centrum	0,71	0,77	+7,83

Procentuální rozdíl délky front v obou případech se pohybuje do 10%, což jsou velmi dobré hodnoty.

V posledním simulačním výstupu bylo porovnáváno průměrné zdržení tramvají ve frontě. Jejich výsledky jsou uvedeny v tab. 4.3.

Tab. 4.3 – Porovnání zdržení tramvají z měření a ze simulace

Zdržení ve frontě	Z měření [s]	Ze simulace [s]	Rozdíl [%]
Směr Poruba	60,08	53,22	-11,42
Směr Centrum	72,33	74,71	+3,29

Ve všech případech při vyhodnocení simulačních výstupů, bylo dosaženo obdobných výsledků získaných z měření. Na základě těchto výsledků, je možné tvrdit, že sestavený simulační model tramvajové dopravy je validní.

5 Vyhodnocení provedených experimentů

V předchozí kapitole byly provedeny simulační experimenty a uvedeny jejich výsledky za účelem validace simulačního modelu. V této kapitole budou provedeny a popsány výsledky dalších simulačních experimentů. Simulační experimenty byly provedeny na sestaveném simulačním modelu tramvajové dopravy. Pro provedení simulačních experimentů je vhodné odstranění všech údajů, které byly použity pro validaci simulačního modelu. Všechny nepotřebné údaje jsou brány jako komentáře, když na začátku řádku je umístěn vykřičník.

Pro sestavený simulační model jsem realizoval dva simulační experimenty a to:

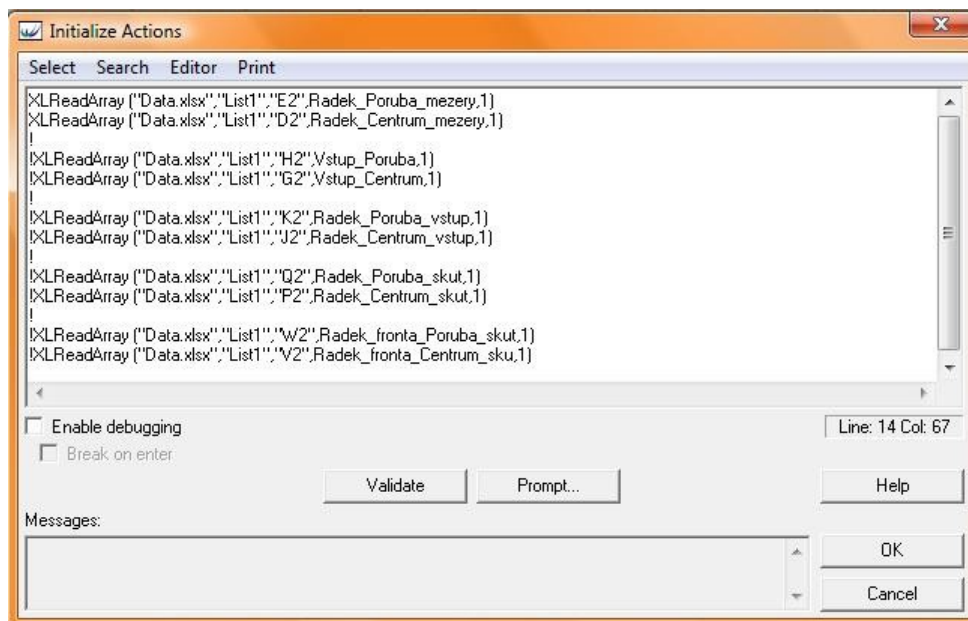
- příjezdy tramvají získané z měření a jejich vpouštění na jednokolejnou trať podle pořadí příjezdu,
- mezery mezi vstupy do systému, kdy ve směru do centra se příjezdy tramvají řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti a mezery mezi příjezdy se tedy řídí exponenciálním rozdělením a ve směru na Porubu se řídí vlastním rozdělením.

5.1 Simulační experiment č. 1

Jsou uvažovány náhodné příjezdy tramvají, které byly získány z měření. Simulační model se bude řídit pouze podle časových vstupů tramvají do systému.

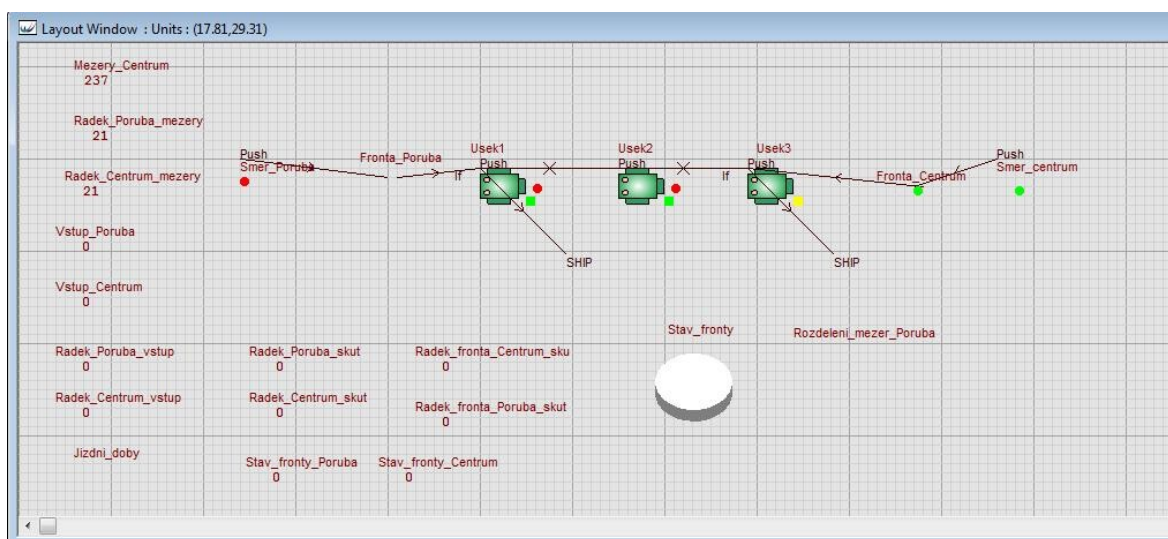
5.1.1 Úprava simulačního modelu pro experiment č. 1

Je nutné odstranění všech údajů sloužící pro validaci modelu. Detail upravených inicializačních akcí je na obr. 5.1.



Obr. 5.1 – Upravené inicializační akce

Pro simulační experiment není potřeba zaznamenávat stav fronty pomocí koláčového grafu „Pie“. Vpouštění tramvaje na jednokolejný úsek proběhne tehdy, pokud se v protisměru nenachází žádná tramvaj. S tímto pravidlem souvisí odstranění podmínky „TIME“ z příkazu: „*IF NPARTS2 (Usek1,Smer_centrum,0) = 0 AND NPARTS2 (Usek2,Smer_centrum,0) = 0 AND NPARTS2 (Usek3,Smer_centrum,0) = 0*“ pro „Usek1“ a „Usek3“. V experimentu nebudou ještě potřebovány výstupní akce pro „Fronta_Poruba“ a „Fronta_Centrum“. Na obr. 5.2 je zobrazen upravený simulační model.



Obr. 5.2 – Simulační model pro experiment č. 1

Výstupem simulačního modelu je porovnání průměrné délky front a průměrného zdržení ve frontě získané z měření a ze simulačního experimentu č. 1. Pro získání výsledků stačí provést jeden simulační běh v délce 3600 s, jelikož sestavený simulační model se chová jako deterministický model. Porovnání výsledků získaných z měření a ze simulačního experimentu č. 1 je v tab. 5.1.

Tab. 5.1 – Porovnání výsledků z měření a ze simulačního experimentu č. 1

	Fronta Poruba [-]	Fronta Centrum [-]	Zdržení Poruba [s]	Zdržení Centrum [s]
Z měření	0,575	0,71	72,33	60,08
Ze simulace	0,16	0,08	15,96	7,77
Rozdíl [%]	-72,17	-88,74	-77,94	-87,07

5.2 Simulační experiment č. 2

V druhém simulačním experimentu jsou simulovány mezery mezi vstupy do systému, které byly zjištěny dopravním průzkumem. Simulační model se stává stochastickým, protože v něm vystupují náhodné proměnné. Aby byl simulační experiment proveden, je nejprve nutné tento experiment nadefinovat. Pomocí Pearsonova χ^2 testu dobré shody bylo zjištěno, že ve směru na centrum se příjezdy tramvají řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti a mezery mezi příjezdy se tedy řídí exponenciálním rozdělením. Pro směr Poruba platí, že příjezdy tramvají se neřídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti. Pro vytvoření vlastního rozdělení pravděpodobnosti pro příjezd tramvají ve směru na Porubu v simulačním programu Witness je nejprve nutné provést zpracování náhodného výběru.

5.2.1 Zpracování náhodného výběru

Pro zpracování náhodného výběru byly zjištěny mezery mezi příjezdy tramvají ve směru na Porubu. Byla vytvořena tab. 5.2 se statistickým souborem.

Tab. 5.2 – Statistický soubor mezer mezi příjezdy ve směru Poruba

Mezery mezi příjezdy [s]	
30	103
30	118
34	119
48	128
49	132
51	133
59	134
62	135
62	135
65	145
73	180
73	183
98	187
98	200
101	210
103	220

Rozsah souboru $n = 32$. Ze získaného statistického souboru je vidět, že nejnižší varianta proměnné $v_{\min} = 30$ s. Nejvyšší varianta proměnné $v_{\max} = 220$ s. Pro variační rozpětí platí:

$$R = v_{\max} - v_{\min} = 220 - 30 = 190 \text{ s}$$

Počet tříd se odhadne pomocí Sturgesova pravidla:

$$k \approx 1 + 3,3 \cdot \log 32 = 5,96 = 6$$

Šířka třídy se stanoví ze vztahu:

$$h \approx \frac{v_{\max} - v_{\min}}{(1 + 3,3 \cdot \log n)} = \frac{220 - 30}{(1 + 3,3 \cdot \log 32)} = 31,8 = 32 \text{ s}$$

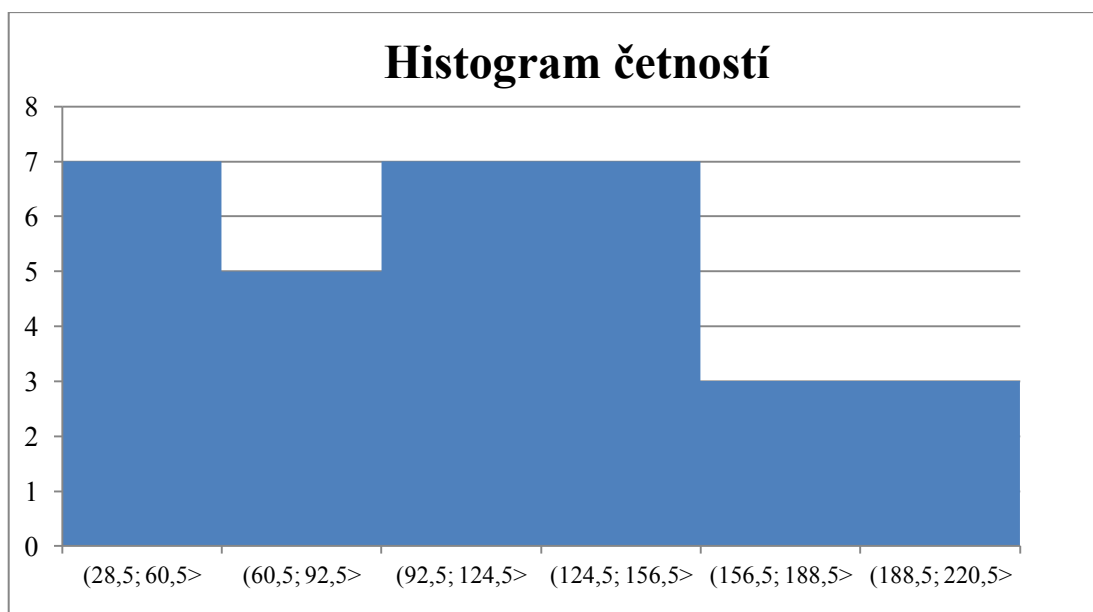
Vynásobí-li se počet tříd „ k “ a šířka třídy „ h “ získá se hodnota 192, která je o 2 více než variační rozpětí. Musí se proto vhodně zvolit dolní hranice 1. třídy zvolena byla snížením o 1,5 nižší než je minimální varianta proměnné tedy $v_{\min} = 28,5$ s.

Byla vytvořena tab. 5.3 se zpracováním náhodného výběru. U jednotlivých tříd je interval zleva otevřený, zprava uzavřený, s takovým intervalem pracuje i MS Excel.

Tab. 5.3 – Zpracování náhodného výběru

Index třídy	Třída	Třídni znak	Četnost
1	(28,5; 60,5>	32,5	7
2	(60,5; 92,5>	64,5	5
3	(92,5; 124,5>	96,5	7
4	(124,5; 156,5>	128,5	7
5	(156,5; 188,5>	160,5	3
6	(188,5; 220,5>	192,5	3
Σ			32

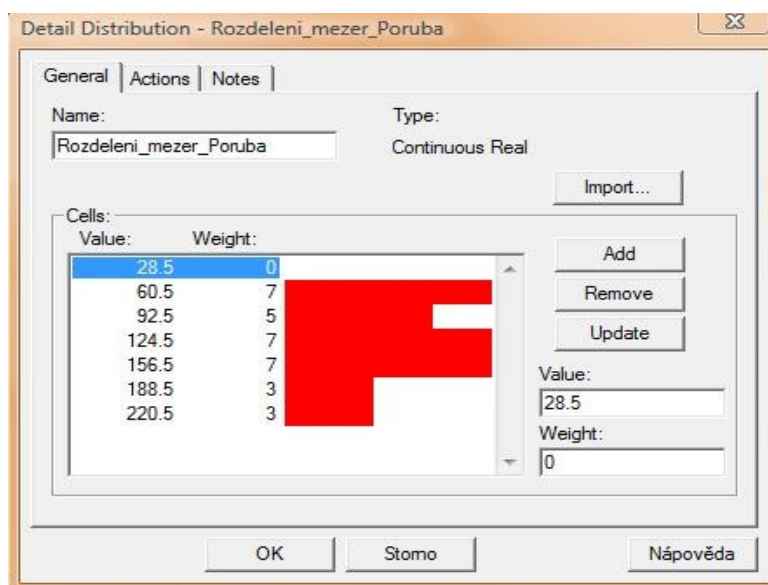
Z této tabulky je následně v programu MS Excel vytvořen graf 5.1 histogram četností. Tento histogram bude následně převeden do simulačního programu Witness k provedení simulačního experimentu.



Graf 5.1 – Histogram četností mezer mezi příjezdy tramvají ve směru na Porubu

5.2.2 Úprava simulačního modelu pro experiment č. 2

Po zpracování náhodného výběru se nyní může nadefinovat vlastní rozdělení pravděpodobnosti pro sestavený simulační model. K definici vlastního rozdělení slouží spojité rozdělení „*RDist*“ a jeho název je „*Rozdeleni_mezers_Poruba*“.

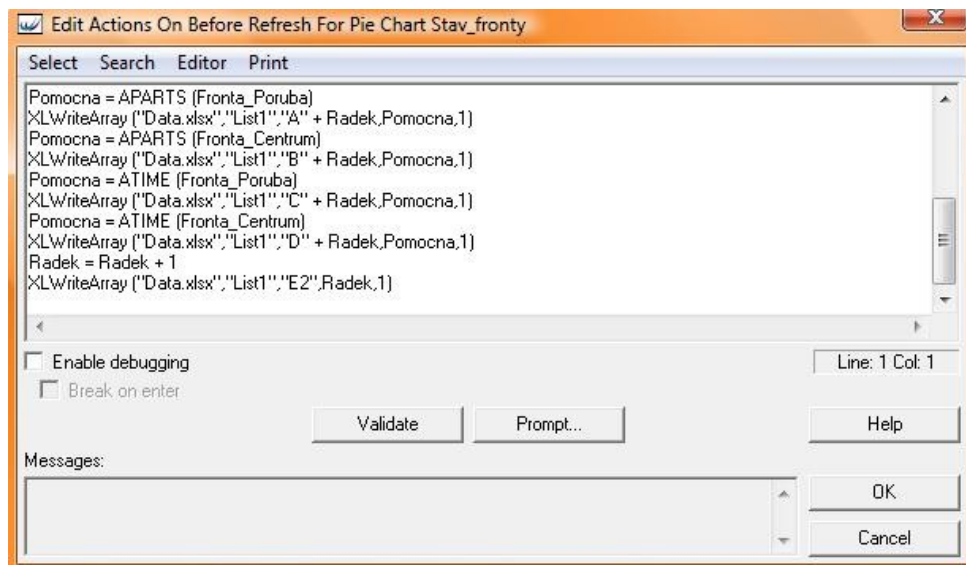


Obr. 5.3 – Definice histogramu četností pro mezery mezi příjezdy ve směru na Porubu

Pro součásti „*Smer_Centrum*“, kdy se mezery mezi vstupy do systému řídí podle exponenciálního rozdělení je definován „*Inter Arrival Time*“ funkcí „*NEGEXP (97.4)*“, kde 97,4 je střední hodnota v sekundách. Funkce „*NEGEXP (97.4)*“ platí i pro „*First Arrival At*“.

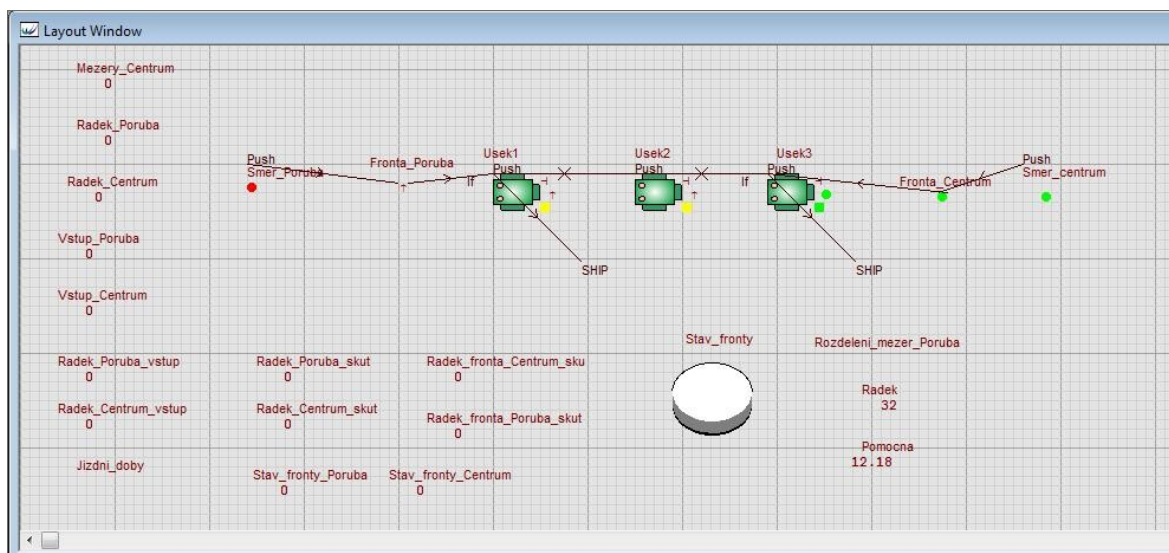
Pro součásti „*Smer_Poruba*“ se mezery mezi vstupy do systému řídí vytvořeným rozdělením. Definování „*Inter Arrival Time*“ a „*First Arrival At*“ je tedy pomocí vytvořeného histogramu četností pod názvem „*Rozdeleni_mezers_Poruba()*“.

Výstupem tohoto simulačního experimentu je získání hodnot stavu front a zdržení ve směru centrum a Poruba. K zápisu výsledků je potřeba vytvořit soubor v programu MS Excel. Podmínky pro zápis výsledků do programu MS Excel jsou definovány v koláčovém grafu „*Stav_fronty*“ viz obr. 5.4.



Obr. 5.4 – Podmínky definované pro zápis výsledků v koláčovém grafu „*Stav_fronty*“

V simulačním modelu jsou vytvořeny dvě nové pomocné proměnné. První proměnná nese název „*Radek*“ a slouží k načítání dalších řádků v programu MS Excel pro zápis výsledků získaných ze simulace. Druhou pomocnou proměnnou je „*Pomocna*“, která slouží pro zápis a má charakter reálné proměnné. Upravený simulační model pro provedení simulačního experimentu č. 2 je na obr. 5.5.



Obr. 5.5 – Simulační model pro experiment č. 2

S tímto modelem bylo provedeno celkem 30 simulačních běhů. Délka jednoho simulačního běhu je 3600 s. Po každé hodině je sledován stav fronty a zdržení v systému.

Bylo získáno 30 různých výsledků, které mají charakter náhodné proměnné. Výsledky simulačního experimentu č. 2 jsou zobrazeny v tab. 5.4.

Tab. 5.4 – Výsledky simulačního experimentu č. 2

Fronta Poruba [-]	Fronta Centrum [-]	Zdržení Poruba [s]	Zdržení Centrum [s]
0,110	0,198	13,693	18,251
0,227	0,148	22,738	11,356
0,178	0,160	18,821	14,432
0,171	0,140	18,092	11,685
0,109	0,103	10,599	12,400
0,107	0,146	13,322	12,532
0,287	0,367	27,912	28,132
0,135	0,085	15,195	7,444
0,098	0,067	12,550	6,669
0,056	0,093	5,962	13,960
0,185	0,116	21,531	10,186
0,095	0,070	11,426	7,684
0,084	0,121	10,479	12,760
0,122	0,127	14,206	11,734
0,067	0,122	6,923	12,242
0,204	0,111	20,438	12,938
0,137	0,049	16,460	5,489
0,156	0,211	16,552	17,294
0,166	0,189	19,260	14,754
0,220	0,143	24,005	12,906
0,133	0,156	14,133	14,776
0,161	0,145	16,603	13,378
0,117	0,106	12,372	11,222
0,122	0,209	12,922	18,843
0,182	0,120	21,193	9,611
0,148	0,112	16,100	11,494
0,194	0,115	22,555	9,639
0,158	0,058	17,723	5,672
0,205	0,152	23,043	13,339
0,064	0,108	7,732	12,177
Průměr	Průměr	Průměr	Průměr
0,147	0,135	16,151	12,500
Směrodatná odchylka σ	Směrodatná odchylka σ	Směrodatná odchylka σ	Směrodatná odchylka σ
0,053	0,060	5,362	4,412

Zpracování získaných výsledků ze simulačního experimentu č. 2 je provedeno intervalovým odhadem střední hodnoty. K výpočtu intervalového odhadu slouží dva vztahy a to:

Dolní mez konfidenčního intervalu:

$$T_d = \bar{x} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot z_{1-\frac{\alpha}{2}}$$

Horní mez konfidenčního intervalu:

$$T_h = \bar{x} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot z_{1-\frac{\alpha}{2}}$$

kde: \bar{x} ... výběrový průměr, v Excelu průměr,
 σ ... směrodatná odchylka v Excelu funkce SMODCH.VÝBĚR,
 n ... rozsah souboru, $n = 30$,
 $z_{1-\frac{\alpha}{2}}$... kvantil normovaného rozdělení, v Excelu funkce NORMSINV,
 α ... hladina významnosti, $\alpha = 0,05$.

$$z_{1-\frac{\alpha}{2}} = z_{0,975} = 1,96$$

Zpracované výsledky simulačního experimentu č. 2 jsou znázorněny v tab. 5.5.

Tab. 5.5 – Výsledky simulačního experimentu č. 2

Fronta Poruba [-]	Fronta Centrum [-]	Zdržení Poruba [s]	Zdržení Centrum [s]
σ	σ	σ	σ
0,053369256	0,06030645	5,36204666	4,411892767
T_d	T_d	T_d	T_d
0,127626711	0,113385496	14,23253992	10,92122217
T_h	T_h	T_h	T_h
0,165821895	0,156545474	18,07003692	14,07871525

Výstupem simulačního experimentu je porovnání výsledků získaných z měření a ze simulačního experimentu č. 2. Výsledky zpracovány v tab. 5.6.

Tab. 5.6 – Porovnání výsledků z měření a ze simulačního experimentu č. 2

	Fronta Poruba [-]	Fronta Centrum [-]	Zdržení Poruba [s]	Zdržení Centrum [s]
Z měření	0,575	0,71	72,33	60,08
Ze simulace	0,146	0,13	16,15	12,49
Rozdíl [%]	-74,61	-81,69	-77,67	-79,21

5.3 Vyhodnocení simulačních experimentů

Z provedených simulačních experimentů a porovnání jejich výsledků s výsledky získaných z měření bylo zjištěno, že v obou simulačních experimentech dojde ke značnému snížení, jak průměrné délky front, tak i průměrného zdržení tramvají ve frontě. Ze zjištěných výsledků vyplývá, že intenzita dopravy není vysoká, tudíž mohou být tramvaje vpouštěny na jednokolejný úsek, podle pořadí jejich příjezdů.

6 Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo sestavení simulačního modelu v simulačním softwaru Witness, který má modelovat vlastnosti reálného provozu tramvajové dopravy. Nejprve bylo nutné pro sestavení simulačního modelu a jeho následnou validaci nutné analyzovat vstupní data a specifikace provozu na jednokolejně trati. Pro předmět této práce byla vybrána jednokolejná trať mezi zastávkami Svinov mosty h.z. a Nová Ves vodárna. Simulační model provozu tramvajové dopravy na jednokolejně trati byl sestavován v simulačním softwaru Witness.

Ze získaných podkladů z provedeného dopravního průzkumu, bylo nutné tyto výsledky analyzovat a byl vytvořen základní simulační model, který následně sloužil pro provedení simulačních experimentů.

Po vyhotovení simulačního modelu bylo možné přejít k jeho validaci. Tato validace byla provedena na porovnání naměřených vstupů se simulovanými vstupy, a jejich procentuální rozdíl, porovnání průměrné délky front z provedeného měření a simulace a jejich procentuální rozdíl a porovnání průměrného zdržení tramvají ve frontě získané z měření a simulace a jejich procentuální rozdíl.

Po provedení validace modelu, kdy nebyly u zvolených charakteristik zjištěny významnější rozdíly oproti reálnému provozu, bylo možné přistoupit k simulačním experimentům. Výchozí simulační model musel být pro vykonání simulačních experimentů mírně upraven. Výstupem obou experimentů bylo sledování průměrné délky front a zdržení tramvají ve frontě. Tyto výsledky byly porovnány s výsledky, které byly získány z provedeného dopravního průzkumu.

V prvním experimentu byly uvažovány náhodné příjezdy tramvají, které byly získány z provedeného měření a jejich vpouštění do systému je řízeno podle pořadí jejich příjezdů před systém.

V druhém experimentu jsou simulovány mezery mezi vstupy do systému, které byly zjištěny pomocí Pearsonova χ^2 test dobré shody, kdy ve směru na centrum se řídí exponenciálním rozdělením a ve směru na Porubu se řídí vlastním rozdělením, které bylo nutné vytvořit v programu Witness.

Dosažené výsledky ze simulačních experimentů v porovnání s reálným provozem vyznačují značné rozdíly ve všech sledovaných charakteristikách. Na základě provedených experimentů, kdy sledované parametry vykazují lepší hodnoty, vyplívá, že intenzita dopravy v přepravní špičce není tak vysoká, tudíž mohou být tramvaje vpouštěny na jednokolejný úsek podle pořadí jejich příjezdů.

Seznam použité literatury

- [1] KŮS Z., GLOMBÍKOVÁ V., HALASOVÁ A. *Simulace výrobních systémů – díl 1*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. 2002. ISBN 55-082-02.
- [2] FOLPRECHT J., *Městská hromadná doprava: (vybrané statě)*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - TUO, 2005. 107 s. ISBN 80-248-0769-6
- [3] KUBÁT B., PENC M., *Městská kolejová doprava*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 121 s. ISBN 80-01-02117-3
- [4] MATUŠ, Jiří.: *Simulační model provozu na traťovém úseku*. 2009. 82 s. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí diplomové práce Ing. Dušan Teichmann, Ph.D. [cit. 2012-02-05].
- [5] PRZYBYLSKI, L.: *Simulační metody jako nástroj pro rozhodování podniku - modelování pomocí programu Witness*. [s.l.], 2008. 90 s. Masarykova univerzita, Ekonomicko-správní fakulta. Vedoucí diplomové práce Ing. Radoslav Škapa, Ph.D. [online] 2008 [cit. 2012-01-30] Dostupný z WWW: http://is.muni.cz/th/100100/esf_m/.
- [6] KOČIČKA, P.: *Simulační metody jako nástroj pro rozhodování podniku - modelování pomocí programu Witness*. [s.l.], 2009. 108 s. Masarykova univerzita, Ekonomicko-správní fakulta. Vedoucí diplomové práce Ing. Radoslav Škapa, Ph.D. [online] 2009 [cit. 2012-01-30] Dostupný z WWW: http://is.muni.cz/th/2840/esf_m/Diplomova_prace_Petr_Kocicka_2840.pdf.
- [7] DORDA M., *Kvantitativní metoda a organizace řízení I – Teorie hromadné obsluhy*. [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava. [cit. 2012-03-01]. Dostupné na WWW: http://homel.vsb.cz/~dor028/Hromadna_obsluha.pdf.
- [8] DORDA, M., *Testování statistických hypotéz*. [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava. [cit. 2012-03-25]. Dostupné na WWW: http://homel.vsb.cz/~dor028/KMORII_3.pdf
- [9] DORDA, M., *Pearsonův test dobré shody*. [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava. [cit. 2012-03-25]. Dostupné na WWW: http://homel.vsb.cz/~dor028/KMORII_5.pdf

- [10] DORDA, M., *Intervalový odhad střední hodnoty*. [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava. [cit. 2012-05-09]. Dostupné na WWW: <http://home1.vsb.cz/~dor028/Aplikace_6.pdf>
- [11] MAHADALOVÁ, I., *Úvod do předmětu městská hromadná doprava*. [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava. [cit. 2012-01-25]. Dostupné na WWW: <fast10.vsb.cz/mahdalova/MHD/predna01.pdf>
- [12] Dostupné na WWW: <http://www.mhdostrava.cz/index.php?s=zabezpeceni_svinov_mosty> [cit. 2012-02-15].
- [13] Ing. Robert Hackenberg – Dopravní podnik Ostrava a.s.

Seznam příloh

Příloha A	Dopravní průzkum
Příloha B	Tabulky měření pro validaci
Příloha C	Tabulka pro simulaci
Příloha D	Tabulky porovnání výsledků pro validaci

Příloha A Dopravní průzkum

Tab. č. p. 1: Příjezd tramvají před signalizační zařízení, směr centrum

Časový interval	Čas příjezdu tramvaje	Časový interval	Čas příjezdu tramvaje
14:00 – 14:01	14:00:18	14:30 – 14:31	-
14:01 – 14:02	-	14:31 – 14:32	-
14:02 – 14:03	14:02:32	14:32 – 14:33	14:32:50
14:03 – 14:04	-	14:33 – 14:34	-
14:04 – 14:05	14:04:10	14:34 – 14:35	14:34:20, 14:34:35
14:05 – 14:06	14:05:21	14:35 – 14:36	-
14:06 – 14:07	-	14:36 – 14:37	-
14:07 – 14:08	14:07:04, 14:07:35	14:37 – 14:38	14:37:34, 14:37:41
14:08 – 14:09	14:08:46	14:38 – 14:39	14:38:11
14:09 – 14:10	-	14:39 – 14:40	-
14:10 – 14:11	-	14:40 – 14:41	-
14:11 – 14:12	-	14:41 – 14:42	14:41:09
14:12 – 14:13	14:12:20, 14:12:41	14:42 – 14:43	14:42:44
14:13 – 14:14	-	14:43 – 14:44	-
14:14 – 14:15	-	14:44 – 14:45	-
14:15 – 14:16	14:15:00	14:45 – 14:46	14:45:47
14:16 – 14:17	-	14:46 – 14:47	-
14:17 – 14:18	14:17:28	14:47 – 14:48	14:47:36, 14:47:51
14:18 – 14:19	-	14:48 – 14:49	14:48:26
14:19 – 14:20	14:19:27	14:49 – 14:50	-
14:20 – 14:21	14:20:10, 14:20:30	14:50 – 14:51	14:50:19
14:21 – 14:22	-	14:51 – 14:52	-
14:22 – 14:23	-	14:52 – 14:53	-
14:23 – 14:24	-	14:53 – 14:54	-
14:24 – 14:25	14:24:15, 14:24:40	14:54 – 14:55	14:54:05
14:25 – 14:26	-	14:55 – 14:56	14:55:49
14:26 – 14:27	-	14:56 – 14:57	14:56:03, 14:56:51
14:27 – 14:28	14:27:39, 14:27:46	14:57 – 14:58	-
14:28 – 14:29	14:28:53	14:58 – 14:59	-
14:29 – 14:30	-	14:59 – 15:00	14:59:51

Tab. č. p. 2: Příjezd tramvají před signalizační zařízení, směr Poruba

Časový interval	Čas příjezdu tramvaje	Časový interval	Čas příjezdu tramvaje
14:00 – 14:01	14:00:05	14:30 – 14:31	14:30:21
14:01 – 14:02	14:01:04	14:31 – 14:32	-
14:02 – 14:03	14:02:45	14:32 – 14:33	14:32:20
14:03 – 14:04	14:03:15	14:33 – 14:34	14:33:22
14:04 – 14:05	-	14:34 – 14:35	14:34:27
14:05 – 14:06	14:05:30	14:35 – 14:36	-
14:06 – 14:07	-	14:36 – 14:37	14:36:10
14:07 – 14:08	14:07:28	14:37 – 14:38	-
14:08 – 14:09	-	14:38 – 14:39	-
14:09 – 14:10	14:09:40	14:39 – 14:40	14:39:10
14:10 – 14:11	-	14:40 – 14:41	-
14:11 – 14:12	14:11:55	14:41 – 14:42	14:41:23, 14:41:36
14:12 – 14:13	-	14:42 – 14:43	-
14:13 – 14:14	14:13:33, 14:13:45	14:43 – 14:44	14:43:19
14:14 – 14:15	-	14:44 – 14:45	-
14:15 – 14:16	14:15:53	14:45 – 14:46	-
14:16 – 14:17	14:16:44	14:46 – 14:47	14:46:26, 14:46:40
14:17 – 14:18	-	14:47 – 14:48	-
14:18 – 14:19	-	14:48 – 14:49	-
14:19 – 14:20	14:19:47	14:49 – 14:50	-
14:20 – 14:21	14:20:49	14:50 – 14:51	14:50:20
14:21 – 14:22	14:21:37	14:51 – 14:52	14:51:58
14:22 – 14:23	14:22:50	14:52 – 14:53	14:52:28
14:23 – 14:24	-	14:53 – 14:54	14:53:17
14:24 – 14:25	-	14:54 – 14:55	-
14:25 – 14:26	-	14:55 – 14:56	14:55:42
14:26 – 14:27	14:26:20	14:56 – 14:57	-
14:27 – 14:28	-	14:57 – 14:58	-
14:28 – 14:29	14:28:34	14:58 – 14:59	-
14:29 – 14:30	14:29:08	14:59 – 15:00	14:59:02

Tab. č. p. 3: Sled pořadí vpuštění tramvají, směr centrum

Čas	Počet tramvají [-]
14:01:13	1
14:03:40	1
14:06:34	1
14:06:51	1
14:07:18	1
14:09:27	1
14:09:44	1
14:13:18	1
14:13:35	1
14:16:03	1
14:18:23	1
14:19:44	1
14:22:18	1
14:22:35	1
14:25:14	1
14:25:31	1
14:28:00	1
14:28:17	1
14:30:47	1
14:33:26	1
14:36:00	1
14:36:17	1
14:38:28	1
14:38:45	1
14:39:02	1
14:41:35	1
14:44:10	1
14:46:21	1
14:49:02	1
14:49:19	1
14:52:11	1
14:52:28	1
14:54:57	1
14:57:13	1
14:57:30	1
14:57:47	1

Tab. č. p. 4: Sled pořadí vpuštění tramvají, směr Poruba

Čas	Počet tramvají [-]
14:00:20	1
14:02:25	1
14:02:45	1
14:04:20	1
14:05:42	1
14:08:20	1
14:11:00	1
14:12:00	1
14:14:48	1
14:15:01	1
14:17:15	1
14:17:30	1
14:21:00	1
14:21:15	1
14:23:52	1
14:24:00	1
14:26:58	1
14:29:30	1
14:29:45	1
14:32:02	1
14:32:22	1
14:34:40	1
14:34:55	1
14:37:27	1
14:40:22	1
14:42:43	1
14:42:58	1
14:45:21	1
14:47:30	1
14:47:45	1
14:50:44	1
14:51:02	1
14:53:32	1
14:53:47	1
14:56:10	1
14:59:05	1

Příloha B Tabulky měření pro validaci

Tab. č. p. 5: Počet souprav ve frontě před signalizačním zařízením, směr centrum

Čas	Počet tramvají [-]	Čas	Počet tramvají [-]	Čas	Počet tramvají [-]
14:00:30	1	14:21:00	2	14:41:30	1
14:01:00	1	14:21:30	2	14:42:00	0
14:01:30	0	14:22:00	2	14:42:30	0
14:02:00	0	14:22:30	0	14:43:00	1
14:02:30	0	14:23:00	0	14:43:30	1
14:03:00	1	14:23:30	0	14:44:00	1
14:03:30	1	14:24:00	0	14:44:30	0
14:04:00	0	14:24:30	1	14:45:00	0
14:04:30	1	14:25:00	2	14:45:30	0
14:05:00	1	14:25:30	0	14:46:00	1
14:05:30	2	14:26:00	0	14:46:30	0
14:06:00	2	14:26:30	0	14:47:00	0
14:06:30	2	14:27:00	0	14:47:30	0
14:07:00	0	14:27:30	0	14:48:00	2
14:07:30	0	14:28:00	2	14:48:30	3
14:08:00	1	14:28:30	0	14:49:00	3
14:08:30	1	14:29:00	1	14:49:30	1
14:09:00	2	14:29:30	1	14:50:00	1
14:09:30	0	14:30:00	1	14:50:30	2
14:10:00	0	14:30:30	1	14:51:00	2
14:10:30	0	14:31:00	0	14:51:30	2
14:11:00	0	14:31:30	0	14:52:00	2
14:11:30	0	14:32:00	0	14:52:30	0
14:12:00	0	14:32:30	0	14:53:00	0
14:12:30	1	14:33:00	1	14:53:30	0
14:13:00	2	14:33:30	0	14:54:00	0
14:13:30	0	14:34:00	0	14:54:30	1
14:14:00	0	14:34:30	1	14:55:00	0
14:14:30	0	14:35:00	2	14:55:30	0
14:15:00	1	14:35:30	2	14:56:00	1
14:15:30	1	14:36:00	2	14:56:30	2
14:16:00	1	14:36:30	0	14:57:00	3
14:16:30	0	14:37:00	0	14:57:30	0
14:17:00	0	14:37:30	0	14:58:00	0
14:17:30	1	14:38:00	2	14:58:30	0
14:18:00	1	14:38:30	2	14:59:00	0
14:18:30	0	14:39:00	0	14:59:30	0
14:19:00	0	14:39:30	0	15:00:00	1
14:19:30	1	14:40:00	0		
14:20:00	0	14:40:30	0		
14:20:30	2	14:41:00	0		

Tab. č. p. 6: Počet souprav ve frontě před signalizačním zařízením, směr Poruba

Čas	Počet tramvají [-]	Čas	Počet tramvají [-]	Čas	Počet tramvají [-]
14:00:30	0	14:21:30	1	14:42:30	2
14:01:00	0	14:22:00	1	14:43:00	0
14:01:30	1	14:22:30	1	14:43:30	1
14:02:00	1	14:23:00	2	14:44:00	1
14:02:30	0	14:23:30	2	14:44:30	1
14:03:00	0	14:24:00	0	14:45:00	1
14:03:30	1	14:24:30	0	14:45:30	0
14:04:00	1	14:25:00	0	14:46:00	0
14:04:30	0	14:25:30	0	14:46:30	1
14:05:00	0	14:26:00	0	14:47:00	2
14:05:30	1	14:26:30	1	14:47:30	2
14:06:00	0	14:27:00	0	14:48:00	0
14:06:30	0	14:27:30	0	14:48:30	0
14:07:00	0	14:28:00	0	14:49:00	0
14:07:30	1	14:28:30	0	14:49:30	0
14:08:00	1	14:29:00	1	14:50:00	0
14:08:30	0	14:29:30	2	14:50:30	1
14:09:00	0	14:30:00	0	14:51:00	0
14:09:30	0	14:30:30	1	14:51:30	0
14:10:00	1	14:31:00	1	14:52:00	1
14:10:30	1	14:31:30	1	14:52:30	1
14:11:00	0	14:32:00	1	14:53:00	1
14:11:30	0	14:32:30	0	14:53:30	2
14:12:00	1	14:33:00	0	14:54:00	0
14:12:30	0	14:33:30	1	14:54:30	0
14:13:00	0	14:34:00	1	14:55:00	0
14:13:30	1	14:34:30	2	14:55:30	0
14:14:00	2	14:35:00	0	14:56:00	1
14:14:30	2	14:35:30	0	14:56:30	1
14:15:00	1	14:36:00	0	14:57:00	0
14:15:30	0	14:36:30	1	14:57:30	0
14:16:00	1	14:37:00	1	14:58:00	0
14:16:30	1	14:37:30	0	14:58:30	0
14:17:00	2	14:38:00	0	14:59:00	0
14:17:30	0	14:38:30	0	14:59:30	0
14:18:00	0	14:39:00	0	15:00:00	0
14:18:30	0	14:39:30	1		
14:19:00	0	14:40:00	1		
14:19:30	0	14:40:30	0		
14:20:00	1	14:41:00	0		
14:20:30	1	14:41:30	1		
14:21:00	2	14:42:00	2		

Tab. č. p. 7: Zdržení ve frontě, směr centrum

Příjezd tramvají	Vpuštění tramvají	Čas zdržení [s]
14:00:18	14:01:13	55
14:02:32	14:03:40	68
14:04:10	14:06:34	144
14:05:21	14:06:51	90
14:07:04	14:07:18	14
14:07:35	14:09:27	112
14:08:46	14:09:44	58
14:12:20	14:13:18	58
14:12:41	14:13:35	54
14:15:00	14:16:03	63
14:17:28	14:18:23	55
14:19:27	14:19:44	17
14:20:10	14:22:18	128
14:20:30	14:22:35	125
14:24:15,	14:25:14	59
14:24:40	14:25:31	51
14:27:39	14:28:00	11
14:27:46	14:28:17	31
14:28:53	14:30:47	114
14:32:50	14:33:26	36
14:34:20	14:36:00	100
14:34:35	14:36:17	102
14:37:34	14:38:28	54
14:37:41	14:38:45	64
14:38:11	14:39:02	51
14:41:09	14:41:35	26
14:42:44	14:44:10	86
14:45:47	14:46:21	34
14:47:36	14:49:02	86
14:47:51	14:49:19	88
14:48:26	14:52:11	225
14:50:19	14:52:28	129
14:54:05	14:54:57	52
14:55:49	14:57:13	24
14:56:03	14:57:30	87
14:56:51	14:57:47	53
14:59:51	15:00:14	23 neuvažují

Tab. č. p. 8: Zdržení ve frontě, směr Poruba

Příjezd tramvají	Vpuštění tramvají	Čas zdržení [s]
14:00:05	14:00:20	15
14:01:04	14:02:25	81
14:02:45	14:02:45	0
14:03:15	14:04:20	65
14:05:30	14:05:42	12
14:07:28	14:08:20	52
14:09:40	14:11:00	80
14:11:55	14:12:00	5
14:13:33	14:14:48	75
14:13:45	14:15:01	76
14:15:53	14:17:15	102
14:16:44	14:17:30	46
14:19:47	14:21:00	73
14:20:49	14:21:15	26
14:21:37	14:23:52	135
14:22:50	14:24:00	70
14:26:20	14:26:58	38
14:28:34	14:29:30	56
14:29:08	14:29:45	37
14:30:21	14:32:02	101
14:32:20	14:32:22	2
14:33:22	14:34:40	78
14:34:27	14:34:55	28
14:36:10	14:37:27	77
14:39:10	14:40:22	132
14:41:23	14:42:43	80
14:41:36	14:42:58	82
14:43:19	14:45:21	122
14:46:26	14:47:30	64
14:46:40	14:47:45	65
14:50:20	14:50:44	24
14:51:58	14:51:02	79
14:52:28	14:53:32	64
14:53:17	14:53:47	30
14:55:42	14:56:10	28
14:59:02	14:59:05	3

Příloha C Tabulka pro simulaci

Tab. č. p. 9: Tabulka vypočítaných mezer mezi vstupy tramvají do systému

Mezery Centrum [s]	Mezery Poruba [s]
134	59
98	101
71	30
103	135
31	118
71	132
214	135
21	98
139	12
148	128
119	51
43	183
20	62
225	48
25	73
179	210
7	134
67	34
237	73
90	119
15	62
179	65
7	103
30	180
178	133
95	23
183	103
109	187
15	14
35	220
113	98
226	30
104	49
14	145
48	200
180	10000
10000	

Příloha D Tabulky porovnání výsledků pro validaci

Tab. č. p. 10: Tabulka porovnání vstupů z měření a ze simulace

Vstup Centrum [s]	Vstup Poruba [s]	Simulovaný vstup Centrum [s]	Simulovaný vstup Poruba [s]
73	20	73	20
220	145	220	145
394	165	394	165
411	260	411,45	265,16
438	342	438	342
567	500	567	500
584	660	584,45	660
798	720	798	720
815	888	815,45	888
963	901	963	903
1103	1035	1103	1035
1184	1050	1184	1050
1338	1260	1338	1260
1355	1275	1355,45	1275
1514	1432	1514	1432
1531	1440	1531,45	1447
1680	1618	1680	1618
1697	1770	1697,45	1770
1847	1785	1847	1785
2006	1922	2006	1922
2160	1942	2160	1942
2177	2080	2177,45	2080
2308	2095	2308	2095
2325	2247	2325,45	2247
2342	2422	2342,9	2422
2495	2563	2495	2563
2650	2578	2650	2578
2781	2721	2781	2721
2942	2850	2942	2850
2959	2865	2959,45	2865
3131	3044	3169,79	3044
3148	3062	3187,24	3128
3297	3212	3297	3232,4
3433	3227	3433	3247,4
3450	3370	3450,45	3370
3467	3545	3467,9	3552

Tab. č. p. 11: Tabulka reálných stavu front ze simulace

Reálný stav fronty Centrum [-]	Reálný stav fronty Poruba [-]				
1	0	1	0	0	1
1	0	0	1	0	0
0	1	2	1	0	0
0	1	2	1	1	1
0	0	2	0	0	2
1	0	2	1	0	2
1	1	1	1	1	0
0	1	0	2	1	1
1	0	0	2	1	1
1	1	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1
1	0	2	0	0	0
1	0	1	0	1	0
2	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	2
2	0	0	0	0	1
0	0	0	0	2	0
0	1	1	0	3	0
1	1	0	0	3	0
1	0	1	1	1	0
2	0	1	1	1	0
1	0	1	0	2	1
0	1	1	1	2	0
0	1	0	1	2	0
0	0	0	1	2	0
0	0	0	0	2	0
0	0	1	0	1	1
0	0	0	0	0	2
1	0	1	0	0	1
2	0	0	1	1	0
1	0	1	2	0	0
0	2	2	0	0	0
0	2	2	0	1	1
1	1	1	0	2	0
1	0	0	1	3	0
1	1	0	1	2	0
0	1	0	0	0	0
0	2	2	0	0	0
1	1	2	0	0	0
1	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	0	0